

# Agradecimentos

A concretização do trabalho que se apresenta nesta tese não seria possível sem o contributo de várias pessoas, às quais gostaria de manifestar todo o meu apreço.

Agradeço à minha mulher Liliana e aos meus pais Fernando e Teresa pelo amor, paciência, compreensão e dedicação no período de elaboração da tese.

Ao Professor Luís Manuel Rodrigues Coelho pela competência na orientação da tese e partilha de conhecimento, contribuindo para o enriquecimento da mesma e acima de tudo um obrigado por acentuar cada vez mais o estímulo pelo conhecimento e desenvolvimento intelectual.

Agradeço à minha colega Rita Cerdeira, pela disponibilidade e apoio que prestou sempre que solicitado.



# Resumo

Apresenta-se um trabalho de simulação numérica de qualidade do ar e conforto térmico numa sala de aula. Devido à importância do cumprimento regulamentar do DL n.º 79/2006 e DL n.º 80/2006, e análise da eficácia de ventilação das normas prENV1752:1997 e ASHRAE Standard 62.1:2004, estudam-se os métodos de ventilação de mistura, cruzado e deslocamento. Para melhoria dos níveis de concentração de CO<sub>2</sub>, consideram-se a optimização do ângulo de insuflação e o incremento do caudal de ar novo. A análise do nível de concentração de CO<sub>2</sub> interior, velocidade e temperatura do ar, e determinação do índice PMV (Predicted Mean Vote), revelou resultados satisfatórios, constituindo o modelo numérico numa ferramenta importante no estudo de métodos de ventilação, com uma redução no caudal mínimo de ar novo em média 10% inferior aos valores regulamentares. A optimização do ângulo de insuflação não permite uma redução dos picos de concentração de CO<sub>2</sub> para níveis regulamentares, sendo necessário considerar a eficácia de ventilação. O método deslocamento é o único método que garante uma velocidade do ar de 0.2 m/s na zona de ocupação, contudo revela a necessidade de uma correcta distribuição do caudal de ar, caso contrário podem repercutir focos de concentração de CO<sub>2</sub> fora do critério máximo regulamentar de 1000 ppm.

**Palavras Chave:** Simulação Numérica, Concentração de CO<sub>2</sub>, Eficácia de Ventilação, Índice de conforto térmico PMV.





# Abstract

This thesis presents a numerical simulation work of air quality and thermal comfort in a classroom. Regarding the importance of legal fulfilment of DL n.º 79/2006 and DL n.º 80/2006, and ventilation effectiveness analysis of prENV1752:1997 and ASHRAE Standard 62.1:2004 norms, it is studied mixing, crossing and displacement ventilation methods. In way to improve CO<sub>2</sub> concentration levels, it is consider an angle supply grille optimisation and ventilation rate increment. The analysis of CO<sub>2</sub> indoor concentration levels, air temperature and velocity, and PMV (Predicted Mean Vote) index, revealed satisfactory results, constituting the numerical model in a very important tool in the study of ventilation methods, with 10% average value reduction of ventilation rate in comparison with legal criteria value. The optimisation of supply angle does not allow the reduction of the CO<sub>2</sub> concentration peaks for legal levels, being necessary to consider ventilation effectiveness. Displacement method is the only method that guarantees an air velocity of 0.2 m/s in the occupied zone, disclosing the requirement of a correct air distribution, otherwise can appear high CO<sub>2</sub> concentration focus, out of maximum legal value of 1000 ppm.

**Keywords:** Numerical Simulation, CO<sub>2</sub> Concentration, Ventilation Effectiveness, comfort thermal index PMV.



# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Índice .....	vii
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xvii
Lista de Siglas e Acrónimos .....	xix
Lista de Símbolos .....	xxi
1 Introdução .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Relevância do problema em estudo .....	1
1.3 Técnicas de garantia da qualidade interior e conforto humano .....	3
1.3.1 <i>Sistemas de AVAC e componentes</i> .....	11
1.3.2 <i>Filtros de ar</i> .....	14
1.3.3 <i>Classificação do ar exterior</i> .....	17
1.3.4 <i>Classificação do ar interior</i> .....	17
1.3.5 <i>Tomadas de ar novo</i> .....	19
1.3.6 <i>Métodos de ventilação</i> .....	19
1.4 Motivação .....	21
1.5 Objectivos .....	22
1.6 Revisão bibliográfica .....	22
1.6.1 <i>Introdução</i> .....	22
1.6.2 <i>Perspectiva histórica dos modelos de turbulência</i> .....	23
1.6.3 <i>Simulação numérica em qualidade do ar interior e conforto térmico</i> .....	26
1.7 Contribuição da tese .....	28
1.8 Organização da dissertação .....	29
2 Modelação matemática e numérica .....	31
2.1 Análise CFD .....	31

2.1.1	<i>Convenções matemáticas</i>	31
2.1.2	<i>Equações de estado</i>	33
2.1.3	<i>Modelação da turbulência (indoor zero equation)</i>	37
2.1.4	<i>Impulsão e flutuabilidade</i>	37
2.1.5	<i>Modelação da radiação</i>	38
2.1.6	<i>Esquema numérico</i>	44
2.2	Modelação da qualidade do ar interior e conforto Térmico	60
2.2.1	<i>Análise de conforto térmico</i>	60
2.2.2	<i>Análise do grau de insatisfação</i>	64
2.2.3	<i>Eficácia de ventilação</i>	68
2.3	Conclusões	70
3	Implementação do caso de estudo	73
3.1	Cálculo de carga térmica	74
3.2	Aplicação do modelo CFD	78
3.3	Condições do modelo	79
3.3.1	<i>Calibração da injeção de CO<sub>2</sub></i>	83
3.3.2	<i>Geração da malha</i>	87
3.3.3	<i>Solução</i>	90
3.4	Conclusões	91
4	Resultados	93
4.1	Calibração do modelo geométrico	93
4.2	Análise de métodos de ventilação em CFD	95
4.3	Conclusões	144
5	Conclusões	151
6	Desenvolvimento futuro	157
	Bibliografia	159
	Anexo I	A.1

# Lista de Figuras

## Capítulo 1

Figura 1.1: Esquema do balanço de caudais volúmicos e concentrações de poluentes. ....	7
Figura 1.2: Esquema do balanço de caudais volúmicos e concentrações de poluentes com eficiência de filtragem. ....	10
Figura 1.3: Esquemática típica de uma unidade de tratamento de ar. ....	11
Figura 1.4: Exemplo do método de mistura no plano de corte horizontal XZ. ....	20
Figura 1.5: Exemplo do método cruzado no plano de corte horizontal XZ. ....	20
Figura 1.6: Exemplo do método de deslocamento no plano de corte vertical XY. ....	20

## Capítulo 2

Figura 2.1: Arquitectura de geração do modelo numérico no FLUENT®. ....	31
Figura 2.2: Processo de transferência de calor por radiação. ....	40
Figura 2.3: Representação dos ângulos $\theta$ e $\phi$ no referencial cartesiano. ....	41
Figura 2.4: Alinhamento da discretização angular com a face do volume de controlo. ....	41
Figura 2.5: Discretização angular com a face do volume de controlo sem alinhamento angular. ....	42
Figura 2.6: Face do volume de controlo com ângulo de controlo. ....	42
Figura 2.7: Pixelização do ângulo de controlo. ....	43
Figura 2.8: Método de resolução de equações de estado. ....	45
Figura 2.9: Discretização de uma equação escalar de transporte num volume de controlo. ....	47
Figura 2.10: Ciclo V e W da multi-malha. ....	55
Figura 2.11: Lógica de controlo do ciclo “Flex”. ....	56
Figura 2.12: Previsão de insatisfação da qualidade de ar interior em função da concentração de CO <sub>2</sub> acima do valor exterior. ....	66
Figura 2.13: Percentagem de insatisfeitos face ao caudal volúmico (extraído de [13]). ....	67

## Capítulo 3

Figura 3.1: Renderização do modelo geométrico para análise de carga térmica.....	74
Figura 3.2: Análise gráfica das cargas térmicas da sala de aula obtida do software DESIGN BUILDER®. ....	77
Figura 3.3: Análise gráfica das cargas térmicas da envolvente Este obtida do software DESIGN BUILDER®. ....	77
Figura 3.4: Análise gráfica das cargas térmicas na envolvente Oeste obtida do software DESIGN BUILDER®. ....	78
Figura 3.5: Pormenor dos elementos terminais de difusão de ar respectivamente no método de mistura e cruzado. ....	82
Figura 3.6: Pormenor dos elementos terminais de difusão de ar no método de deslocamento. ....	82
Figura 3.7: Determinação da equação de regressão linear para obtenção de RQ em função da taxa metabólica. ....	84
Figura 3.8: Produção de CO <sub>2</sub> e consumo de O <sub>2</sub> em função da taxa de metabolismo. ....	85
Figura 3.9: Pormenor dos elementos terminais de difusão de ar na calibração do modelo numérico. ....	86
Figura 3.10: Integração 3D da malha hexaedrica no domínio de cálculo. ....	88
Figura 3.11: Integração no plano de corte XY da Malha hexaedrica no domínio de cálculo.....	88
Figura 3.12: Análise da qualidade da malha hexaedrica. ....	89
Figura 3.13: Análise da qualidade da malha hexaedrica pelo alinhamento das faces. ....	90

## Capítulo 4

Figura 4.1: Convergência da solução de cálculo da calibração do modelo numérico. ....	93
Figura 4.2: Gradiente de concentração de CO <sub>2</sub> nos planos de cortes com y=1.692 m, x=1.2 e x=5m. ....	94
Figura 4.3: Gradiente de concentração de CO <sub>2</sub> no plano de corte YZ para a fila de ocupante de pé, 1ª e 2ª fila de ocupantes sentados. ....	94
Figura 4.4: Gradiente de concentração de CO <sub>2</sub> no plano de corte XY para z=0.2, 2.5, 4.8 m... ..	95
Figura 4.5: Localização dos pontos de medição de assimetrias verticais. ....	97

Figura 4.6: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\alpha$ para o método mistura, cruzado e deslocamento no plano de corte XZ. ....	102
Figura 4.7: Pormenor da grelha com um ângulo de insuflação ( $\theta=63.43^\circ$ ) .....	103
Figura 4.8: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\beta$ para o método mistura e cruzado no plano de corte XZ.....	103
Figura 4.9: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura, cruzado e deslocamento no plano de corte XZ. ....	105
Figura 4.10: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\alpha$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).....	106
Figura 4.11: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\alpha$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).....	106
Figura 4.12: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\alpha$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ). ....	107
Figura 4.13: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).....	108
Figura 4.14: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).....	108
Figura 4.15: Distribuição da concentração de CO <sub>2</sub> do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ). ....	109
Figura 4.16: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\alpha$ . ....	110
Figura 4.17: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\alpha$ . ....	111
Figura 4.18: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\alpha$ . ....	111
Figura 4.19: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\gamma$ .....	111
Figura 4.20: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\gamma$ . ....	112
Figura 4.21: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\gamma$ . ....	112
Figura 4.22: Distribuição da idade média do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ) e XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).....	113

Figura 4.23: Distribuição da idade média do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ) e XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ). .....	114
Figura 4.24: Distribuição da idade média do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ) e XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ). .....	115
Figura 4.25: Trajectória das partículas de ar no método de mistura para o método $\gamma$ .....	116
Figura 4.26: Trajectória das partículas de ar no método cruzado para o método $\gamma$ .....	117
Figura 4.27: Trajectória das partículas de ar no método deslocamento para o método $\gamma$ .....	117
Figura 4.28: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ). .....	119
Figura 4.29: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ). .....	119
Figura 4.30: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ). .....	120
Figura 4.31: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ). .....	121
Figura 4.32: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ). .....	121
Figura 4.33: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ). .....	121
Figura 4.34: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ). .....	122
Figura 4.35: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ). .....	122
Figura 4.36: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ). .....	122
Figura 4.37: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ). .....	122
Figura 4.38: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ). .....	123
Figura 4.39: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ). .....	123



Figura 4.40: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ). .....	123
Figura 4.41: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ). .....	123
Figura 4.42: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ). .....	124
Figura 4.43: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\alpha$ . .....	125
Figura 4.44: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\alpha$ . .....	125
Figura 4.45: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\alpha$ . .....	125
Figura 4.46: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\gamma$ . .....	126
Figura 4.47: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\gamma$ . .....	126
Figura 4.48: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\gamma$ . .....	126
Figura 4.49: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ). .....	127
Figura 4.50: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ). .....	127
Figura 4.51: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ). .....	128
Figura 4.52: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ). .....	129
Figura 4.53: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ). .....	129
Figura 4.54: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ). .....	129
Figura 4.55: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ). .....	130
Figura 4.56: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ). .....	130

Figura 4.57: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ). .....	130
Figura 4.58: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ). .....	131
Figura 4.59: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ). .....	131
Figura 4.60: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ). .....	131
Figura 4.61: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ). .....	132
Figura 4.62: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ). .....	132
Figura 4.63: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ). .....	132
Figura 4.64: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\alpha$ . .....	133
Figura 4.65: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\alpha$ . .....	133
Figura 4.66: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\alpha$ . .....	133
Figura 4.67: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\gamma$ . .....	134
Figura 4.68: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\gamma$ . .....	134
Figura 4.69: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\gamma$ . .....	134
Figura 4.70: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $y=0.47$ ). .....	136
Figura 4.71: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $y=1.165$ ). .....	136
Figura 4.72: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=0.47$ ). .....	136

Figura 4.73: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=1.165$ ).	137
Figura 4.74: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=0.47$ ).	137
Figura 4.75: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=1.165$ ).	137
Figura 4.76: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $y=2.5$ ).	138
Figura 4.77: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método mistura no plano de corte XY ( $y=3.07$ ).	138
Figura 4.78: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=2.5$ ).	138
Figura 4.79: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=3.07$ ).	139
Figura 4.80: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=2.5$ ).	139
Figura 4.81: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação $\gamma$ para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=3.07$ ).	139
Figura 4.82: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\alpha$ .	140
Figura 4.83: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\alpha$ .	141
Figura 4.84: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\alpha$ .	141
Figura 4.85: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\alpha$ .	141
Figura 4.86: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\alpha$ .	142
Figura 4.87: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\alpha$ .	142
Figura 4.88: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\gamma$ .	143
Figura 4.89: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação $\gamma$ .	143

Figura 4.90: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\gamma$ .....	143
Figura 4.91: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação $\gamma$ .....	144
Figura 4.92: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\gamma$ .....	144
Figura 4.93: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação $\gamma$ .....	144

# Lista de Tabelas

## Capítulo 1

Tabela 1.1: Concentrações máximas regulamentares dos parâmetros de medição da QAI (extraído de [3]). .....	5
Tabela 1.2: Caudais mínimos de ar novo de acordo com o RSECE para cada tipo de actividade (extraído de [3]). .....	9
Tabela 1.3: Classificação de filtros de partículas de acordo com a EN 779:2002 (extraído de [17]). .....	15
Tabela 1.4: Classificação de filtros de elevada eficiência de acordo com a EN 779:2002 (extraído de [17]). .....	16
Tabela 1.5: Categoria do ar exterior segundo EN13779 (extraído de [18]). .....	17
Tabela 1.6: Categoria do ar interior segundo EN13779 (extraído de [18]). .....	18
Tabela 1.7: Classificação dos filtros segundo EN13779 (extraído de [18]). .....	18
Tabela 1.8: Distâncias de localização das tomadas de ar novo. ....	19
Tabela 1.9: Performance dos modelos de Eddy-Viscosity e Stress-Reynolds testados por Chen (1995, 1996) (extraído de [21] [22]). .....	24
Tabela 1.10: Performance dos modelos de turbulência testados por Zhang (extraído de [33]).	25

## Capítulo 2

Tabela 2.1: Caracterização dos termos da equação do balanço térmico.....	61
Tabela 2.2: Categorização da qualidade de ar perceptível (extraído de [13]). .....	67
Tabela 2.3: Eficácia de ventilação dos métodos de ventilação prENV1752:1997 (extraído de [13]). .....	69
Tabela 2.4: Eficácia de ventilação para as configurações de distribuição do ar ASHRAE Standard 62.1:2004 (extraído de [9]). .....	70

## Capítulo 3

Tabela 3.1: Dados de entrada no software DESIGN BUILDER® .....	75
Tabela 3.2: Fluxos de calor através das envolventes da sala de aula. ....	76
Tabela 3.3: Valores típicos para diversos níveis de actividade (extraído de [63]).....	80
Tabela 3.4: Isolamento térmico de peças de vestuário (extraído de [13]). ....	80
Tabela 3.5: Valor comparativo de concentração de CO <sub>2</sub> obtido entre a equação de diluição e o FLUENT®. ....	87
Tabela 3.6: Volume de Injecção de CO <sub>2</sub> de acordo com actividade metabólica. ....	87

## Capítulo 4

Tabela 4.1: Coordenadas cartesianas dos pontos de medição para análise de valores de assimetria vertical. ....	96
Tabela 4.2: Características dos elementos de difusão de ar no método de ventilação $\alpha$ . ....	98
Tabela 4.3: Características dos elementos de difusão de ar no método de ventilação $\beta$ (ângulo $\theta=63.43^\circ$ ). ....	99
Tabela 4.4: Características dos elementos de difusão de ar no método de ventilação $\gamma$ . ....	100
Tabela 4.5: Diferença de concentrações de CO <sub>2</sub> na optimização do ângulo de insuflação da grelha. ....	104
Tabela 4.6: Determinação das quantidades mínimas de ar novo em conformidade com as normas e regulamento (parte extraída de [3], [9], [13]). ....	147
Tabela 4.7: Apresentação dos valores do caudal de ar novo com aplicação da eficácia de ventilação de acordo com as normas e regulamento (parte extraída de [9], [13]).	147
Tabela 4.8: Apresentação dos resultados de eficácia de ventilação obtidos das simulações numéricas de acordo com os caudais volúmicos do RSECE.....	147
Tabela 4.9: Apresentação dos resultados de eficácia de ventilação obtidos das simulações numéricas com aplicação da ASHRAE Standard 62.1:2004 para o método $\gamma$ . ....	149
Tabela 4.10: Apresentação dos resultados de eficácia de ventilação obtidos das simulações numéricas comparativamente aos valores da prENV1752:1997. ....	149

# Lista de Siglas e Acrónimos

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AQS	Águas Quentes Sanitárias
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
CEN	Comité Européen du Normalisation
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COV'S	Componentes Orgânicos Voláteis
DL	Decreto-lei
FCS	Factor de Calor Sensível
HEPA	High Efficiency Particulate Air
MDF	Medium-Density Fiberboard
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Azoto
O <sub>3</sub>	Ozono
PD	Percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos
PIER	Public Interest Energy Research
PMV	Predicted Mean Vote (Voto médio previsível)
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied (Percentagem pessoas insatisfeitas)
PPM	Partes Por Milhão
PPMV	Partes Por Milhão em Volume

PQ	Perito Qualificado
QAI	Qualidade de Ar Interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RQ	Quociente Respiratório
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios
SED	Síndrome dos Edifícios Doentes
SIMPLE	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
SETPOINT	Valor de temperatura pretendida
ULPA	Ultralow Penetration Air
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo
VAV	Volume de Ar Variável
Ventilação $\alpha$	Ventilação normal
Ventilação $\beta$	ventilação com correcção do ângulo de insuflação
Ventilação $\gamma$	ventilação normal com agravamento no caudal de ar novo



# Lista de Símbolos

## *Letras Romanas*

$a$	Coeficiente de Absorção
$a_p$	Coeficiente linearizado para $\phi$ (quantidade escalar)
$a_{nb}$	Coeficiente linearizado por $\phi_{nb}$
$a_p$	Coeficiente central
$A_D$	Área de Dubois
$A^H$	Operador do nível de refinação
$\vec{A}$	Vector área de superfície
$\vec{A}_f$	Area da face $f$ , $ A  \left( = \left  A_x \hat{i} + A_y \hat{j} + A_z \hat{k} \right , 3D \right)$
$\vec{b}, \vec{B}$	Quantidade vectorial
$C_{CO_2}$	Concentração de $CO_2$ acima da concentração exterior
$C_e$	Concentração de $CO_2$ no exterior
$C_{ext}$	Concentração de $CO_2$ na extracção
$C_i$	Concentração de $CO_2$ na zona da respiração
$C_i(t)$	Concentração de $CO_2$ no interior ao longo do tempo
$C_0$	Concentração de $CO_2$ inicial na insuflação
$C_p$	Calor específico a pressão constante
$C_s$	Concentração de $CO_2$ na insuflação

$d$	Termo de defeito
$d_f$	Termo função de $\overline{ap}$
$D_f$	Coeficiente de difusão turbulento
$D_{i,m}$	Coeficiente difusivo da espécie $i$ na mistura
$f$	Definição da face
$f_{cl}$	Factor de vestuário
$F$	Força
$\vec{F}$	Vector Força
$\bar{F}$	Termo da fonte constante
$g$	Aceleração da gravidade
$G$	Produção de $CO_2$ devido a ocupação
$Gr$	Número de Grashof
$h$	Entalpia sensível
$h_c$	Coeficiente de convecção entre a superfície exterior do vestuário e o ar interior
$h_i$	Entalpia sensível de uma espécie $i$
$H$	Altura do corpo
$I$	Intensidade de radiação para a grandeza em índice
$I$	Intensidade de radiação dependente da posição $\vec{r}$ e direcção $\vec{s}$
$I_{cl}$	Índice de resistência térmica do vestuário
$I_{ID}$	Matriz Identidade da tensão
$\vec{i}$	Coordenada no domínio tridimensional perpendicular a $\vec{j}$ e $\vec{k}$

$\Delta i$	Incremento de iterações no passo
$j_f$	Fluxo de massa na face $f$
$\vec{j}$	Coordenada no domínio tridimensional perpendicular a $\vec{i}$ e $\vec{k}$
$\bar{J}$	Fluxo difusivo da espécie para a grandeza em índice
$J_f^*$	Fluxo mássico estimado em cada iteração
$\hat{J}_f$	Fluxo mássico corrigido
$k$	Condutividade molecular
$k_t$	Condutividade devido ao transporte turbulento
$\vec{k}$	Quantidade vectorial no domínio tridimensional perpendicular a $\vec{i}$ e $\vec{j}$
$L$	Distância até à parede mais próxima
$Le_i$	Número de Lewis associado à espécie $i$
$m$	Massa
$M$	Massa molar da espécie em índice
$M$	Metabolismo
$n$	Taxa de renovação de ar por hora
$n$	Índice refractivo do meio de propagação perto da parede
$nb$	Células vizinhas
$N$	Octante do espaço angular $4\pi$ discretizado num ponto espacial
$N$	Número total de espécies no domínio de cálculo
$N_{\text{faces}}$	Número de faces de fecho de malha
$p$	Pressão estática
$p_{c0}$	Valor de pressão no lado da face da célula 0

$p_{C1}$	Valor de pressão no lado da face da célula 1
$p_{op}$	Pressão atmosférica
$p_{vap}$	Pressão parcial de vapor de água do ar ambiente
$p^*$	Valor da pressão estimado em cada iteração (método SIMPLE)
$p'$	Valor da pressão corrigido para garantir a conservação de massa (método SIMPLE)
$P$	Operador de prolongamento
$Pe$	Número de Peclet.
$Pr_{eff}$	Número de Prandtl efectivo
$Pr_t$	Número de Prandtl turbulento
$q$	Fluxo de radiação incidente para a grandeza em índice
$q_v$	Caudal volumico de ventilação associado ao ar novo
$R$	Constante do gás universal
$R$	Operador de restrição
$Re$	Número de Reynolds
$R_i$	Soma absoluta dos valores residuais com $i$ relaxações
$\vec{r}$	Vector posição
$s$	Determinada direcção
$s$	Comprimento da trajectória
$S_h$	Termo fonte de calor volumétrico
$S_i$	Taxa resultante da adição de fontes definidas
$S_\phi$	Fonte de $\phi$ por unidade de volume

$\vec{s}$	Vector direcção
$\vec{s}'$	Dispersão do vector direcção
$\Delta s$	Incremento no passo
$t$	Tempo
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$T$	Temperatura
$T_a$	Temperatura do ar
$T_{cl}$	Temperatura exterior do vestuário
$T_{rm}$	Temperatura radiante média dos elementos opacos do espaço
$\Delta T$	Diferença de temperatura
$u$	Componente da velocidade
$v_n$	Velocidade na direcção normal
$\vec{v}$	Vector velocidade para a grandeza em índice $(u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k})$
$V$	Magnitude da velocidade
$V$	Volume da célula
$V_{\text{espaço}}$	Volume do espaço
$V_{O_2}$	Consumo de oxigénio
$V_{\text{resp}}$	Caudal volúmico de ar novo na zona de respiração do espaço ocupado
$W$	Massa do corpo
$x$	Coordenada no domínio tridimensional perpendicular a $y$ e $z$
$\Delta x_j$	Espaçamento da malha adjacente à parede
$y$	Coordenada no domínio tridimensional perpendicular a $x$ e $z$

$Y_i$	Fracção mássica de cada espécie $i$
$z$	Coordenada no domínio tridimensional perpendicular a $x$ e $y$

### *Letras gregas*

$\alpha$	Absorsividade
$\alpha$	Factor de relaxação
$\beta$	Coeficiente de expansão térmica
$\varepsilon$	Emissividade
$\varepsilon_p$	Emissividade da parede
$\varepsilon_f$	Eficiência de filtração
$\varepsilon_v$	Eficácia de ventilação
$\varepsilon_\omega$	Emissividade da parede
$\phi$	Quantidade escalar genérica
$\phi$	Ângulo azimutal de controlo
$\phi_f$	Valor de $\phi$ convectado através da face $f$
$\Phi$	Função fase
$\Gamma_\phi$	Coeficiente difusivo para $\phi$
$\nabla_\phi$	Gradiente de $\phi$ $\left(= (\partial\phi/\partial x)\hat{i} + (\partial\phi/\partial y)\hat{j} + (\partial\phi/\partial z)\hat{k}, 3D\right)$
$\mu$	Viscosidade dinâmica molecular
$\mu_{ef}$	Viscosidade dinâmica efectiva
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica turbulenta
$\nu$	Viscosidade cinemática

$\theta$	Ângulo polar de controlo
$\rho$	Massa específica
$\rho$	Reflectividade
$\rho_0$	Massa específica operativa
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\sigma_s$	Coeficiente de dispersão
$\tau$	Transmissividade
$\tau_p$	Tensor de tensões viscosas
$\psi$	Correcção de método multi-malha
$(\nabla\phi)_n$	Magnitude de $\nabla\phi$ normal à face f
$\Omega$	Ângulo sólido





# 1 Introdução

## 1.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se efectuar um enquadramento do objectivo do trabalho no desenvolvimento da temática iniciada a alguns anos atrás após a crise energética na década de 70, quando os factores energéticos superaram os interesses do foro da qualidade do ar interior. Assiste-se contudo a uma reversão dos conceitos, após alguns alertas mediáticos, nomeadamente associados ao SED (Síndrome dos Edifícios Doentes), com uma crescente preocupação pela qualidade de ar interior. Têm sido estudadas algumas tecnologias de controlo da qualidade do ar interior, tais como metodologias de ventilação para redução de contaminantes gerados no interior dos espaços ocupados.

Pretende-se mostrar ao leitor o enquadramento da tese na vida quotidiana, bem como os interesses e motivações associadas.

## 1.2 Relevância do problema em estudo

A qualidade do ar surge como temática preocupante nos últimos 39 anos derivado da crise energética de 1970, convergindo as linhas iniciais meramente económicas em linhas de eficiência energética, através da construção de edifícios cada vez mais estanques para controlo dos balanços energéticos.

A entrada controlada de ar novo no edifício como resultado da gestão energética, e consequente aumento da humidade específica interior, da geração de poluentes ocupacionais e/ou da libertação de COV's (Componentes Orgânicos Voláteis) derivado dos materiais sintéticos que constituem os revestimentos interiores, condiciona o ambiente para um nível de qualidade de ar medíocre, catapultando os riscos de problemas respiratórios e diminuição do índices de produtividade laboral entre 5% e 9% [1].

No quotidiano estima-se que a população passe cerca de 80% do tempo em ambientes interiores [2], pelo que aliado a um forte crescimento na utilização de materiais sintéticos, fortes emissores de um vasto lote de substâncias químicas, o nível de poluição interior tende a assumir um crescimento considerável. Desta forma torna-se necessário adequar uma taxa de ventilação de ar novo em conformidade com a ocupação ou a área, actividade metabólica, eficácia de ventilação e existência de materiais não ecologicamente limpos [3], de forma a garantir as necessidades de qualidade e conforto térmico interior.

O CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) como produto resultante do processo de respiração do ser humano pode ser considerado como um gás traçador, na medida que se traduz num óptimo indicador da qualidade de ar interior por estar relacionado com o nível de ocupação de um espaço. Dotado de uma característica incolor e inodora, pode variar em ambientes interiores

num espectro de concentrações entre 700 e 2000 ppm (Partes Por Milhão). A Legislação Portuguesa através do DL (Decreto Lei) n.º 79/2006 [3] apresenta valores máximos admissíveis relativos ao conforto térmico em ambientes interiores de concentrações máximas de CO<sub>2</sub> de cerca de 1800 mg/m<sup>3</sup> ou 984 ppm. Em concentrações superiores a 30000 ppm, os efeitos no ser humano resultam em dores de cabeça, tonturas e náuseas [4].

O equilíbrio da concentração de CO<sub>2</sub> num ambiente interior requer a necessidade de adoptar métodos de ventilação de introdução de ar novo que confiram ao espaço a complexidade do cumprimento dos níveis de qualidade, conforto interior e eficiência energética. O estudo de diversos métodos de ventilação através de softwares em CFD (Computacional Fluid Dynamics) permite uma análise rigorosa dos parâmetros variáveis no campo espacial, e consequente optimização dos sistemas de ventilação.

A exigência dos critérios de qualidade de ar interior nos níveis mínimos regulamentares [3] como regra de boas práticas de implementação no mercado garante resultados de melhoria no âmbito de saúde, nível de satisfação e conforto térmico. A obtenção de uma excelente qualidade do ar depende de factores como o tipo e concentração de poluentes no espaço, a qualidade e quantidade de ar novo, o escoamento do ar e contaminantes arrastados, a limpeza do próprio ambiente e do sistema de ventilação e climatização.

O nível de conforto térmico surge como objectivo intrínseco no processo da qualidade do ar interior, e assenta nas principais variáveis basilares como a temperatura e velocidade do ar, humidade relativa, indumentária dos ocupantes e nível de actividade dos mesmos. Em ambientes interiores com amplitudes elevadas de temperatura e humidade, os ocupantes apresentam insatisfação, desconforto e menor capacidade na elaboração das tarefas.

A qualidade de ar interior e conforto térmico é legislado através do DL n.º 80/2006 [5], onde estabelece que as *“As condições ambientes de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20 °C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25 °C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento”*, e do DL n.º 79/2006 [3], tendo como objectivo: *“Definir as condições de conforto térmico e de higiene que devem ser requeridas (requisitos exigenciais) nos diferentes espaços dos edifícios, em consonância com as respectivas funções”*, destacando-se que *“a velocidade do ar interior não deve exceder os 0.2 m/s e que quaisquer desequilíbrios radiativos térmicos devem ser devidamente compensados”*. Velocidades excessivas não são só prejudiciais ao conforto térmico, como provocam o arrastamento potencial de partículas, constituindo um problema acrescido à QAI (Qualidade do Ar Interior). Integrado ainda no DL n.º 79/2006, destaca-se a exigência dos caudais mínimos de ventilação de acordo com o tipo de actividade, com o tipo de materiais de revestimento, zona de fumadores, eficácia de ventilação e as concentrações máximas de referência de “poluentes”, nomeadamente o CO<sub>2</sub> para valores máximos de 1800 mg/m<sup>3</sup>.

## 1.3 Técnicas de garantia da qualidade interior e conforto humano

As fontes de poluição interiores que libertam gases ou partículas no ar são a causa primária de problemas de qualidade de ar. Uma ventilação de ar novo inadequada às necessidades de cada ocupante pode elevar os níveis de poluição interior por incapacidade de diluição das emissões das fontes interiores e/ou por incapacidade de remoção dos poluentes para o exterior por exaustão. Condições higrométricas do ar que revelem elevada temperatura e humidade específica promovem igualmente o aumento da concentração de alguns poluentes.

No interior de um espaço existem inúmeras fontes de poluição, destacando no grupo das fontes de combustão o óleo, gás, carvão, madeira e tabaco; no grupo dos materiais de construção e mobiliários, os materiais que compõem os isolamentos térmicos, os MDF's (Medium-Density Fiberboards), produtos de limpeza, manutenção e higiene pessoal; nos sistemas activos de climatização, os equipamentos de humificação e nas fontes exteriores, o radão e a poluição exterior. A importância relativa de cada fonte depende primordialmente da sua quantidade emitida e da sua toxicidade.

Os efeitos de uma má qualidade de ar interior podem ser reflectidos imediatamente após a exposição ou durante os próximos anos. Os efeitos imediatos caracterizam-se por irritações, dores de cabeça e fadiga em curtos períodos de tempo, no entanto os sintomas podem ser eliminados quando os ocupantes são afastados das fontes. Alguns efeitos imediatos são semelhantes as constipações ou doenças virais, dificultando na determinação se os sintomas são resultado da exposição à poluição do ar interior. Desta forma torna-se necessário efectuar um procedimento de averiguação do tempo e o local onde os sintomas ocorrem, pois caso os sintomas desapareçam quando o ocupante se desloca para a sua habitação, deverão ser reunidos esforços para a identificação das fontes de poluição interiores. Os efeitos a longo prazo resultam de um tempo de exposição prolongado durante muitos anos ou simplesmente aparecem anos mais tarde após o período de exposição. Os efeitos caracterizam-se por doenças respiratórias, doenças cardíacas, cancro, etc.

Os contaminantes do ar podem ser caracterizados do seguinte modo: partículas sólidas ou líquidas e gases, orgânicos ou inorgânicos, visíveis ou invisíveis, microscópicos ou macroscópicos, tóxicos ou não tóxicos, estáveis ou não estáveis. Os contaminantes no ar podem ser agrupados, podendo formar pó e fumos. No caso de partículas sólidas podem formar vapores, sprays e nevoeiros, e caso sejam partículas líquidas, vapores e gases [6]. As partículas que constituem a poeira atmosférica são uma complexa mistura de fumos, vapores, partículas granulares secas, fibras naturais e sintéticas, animais e vegetais em decomposição e fragmentos metálicos. Podem conter microrganismos vivos, tais como fungos, bolores, bactérias e pólenes. As partículas sobretudo as respiráveis (partículas de dimensão inferior a  $10\text{ }\mu\text{m}$ ), PM10 são consideradas dos poluentes mais prejudiciais derivado à impossibilidade de serem filtrados pelo sistema nasal e atingirem os pulmões. A generalidade dos gases quando

em concentrações superiores às normais, ou a presença de determinados gases, podem ter efeitos nefastos, podendo dividi-los em quatro categorias: tóxicos, odoríferos, irritantes e com capacidade de deterioração de materiais [7].

Em ambientes interiores, os principais contaminantes advêm das pessoas e suas actividades, dos materiais de isolamento e decoração, mobiliário, alcatifa, edifícios, solos (aterros e zonas graníticas) e ar exterior: Os poluentes interiores mais comuns são constituídos por COV's, e são integrados no grupo de vapores que incluem um elevado número de compostos, microrganismos onde se destacam as bactérias e os fungos, gases inorgânicos como o CO<sub>2</sub>, CO (Monóxido de Carbono) e as partículas respiráveis com dimensão inferior a 10 µm. A nível dos ocupantes e suas actividades, estes são considerados fontes intermitentes de poluição, libertando através da respiração e transpiração poluentes como o CO<sub>2</sub>, vapor de água e bioefluentes. O aumento gradual do tempo de permanência nos espaços interiores, com o aumento da estanqueidade dos edifícios e crescente utilização da ventilação mecânica como único processo de renovação do ar interior, torna os ocupantes como fonte relevante de poluição. Outras actividades inerentes aos ocupantes como fumar, contendo numerosos poluentes gasosos e partículas, bem como outras actividades que impliquem a combustão como cozinhar e aquecimento com emissão de poluentes de NO<sub>x</sub> (Óxidos de Azoto), CO, partículas em suspensão e COV's, são igualmente importantes no estudo da qualidade do ar interior.

Os sistemas de ventilação podem constituir igualmente uma fonte de poluição para o interior do edifício, quer devido a um deficiente projecto ou uma má construção. Como exemplo destaca-se a colocação de tomadas de ar novo em locais inadequados com proximidade a garagens, locais de carga e descarga, depósitos de lixo, ou com alguma proximidade ao solo. Uma ineficiente manutenção, concepção e instalação dos próprios componentes dos sistemas de ventilação (filtros colmatados, condutas sujas, retenção de condensados, etc.) podem constituir com fonte de poluição para o interior do edifício.

O ar exterior é constituído por contaminantes e impurezas atmosféricas que podem ser geradas por processos naturais através da erosão do vento, actividade vulcânica ou actividades desenvolvidas pelo homem, tais como através de centrais de produção de energia, transporte, processos industriais, construção, agricultura [8].

Os contaminantes que o RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios) [3] prevê que sejam alvo de medições da QAI, bem como os seus limites legais, são descritos na Tabela 1.1, destacando (*\*se aplicável*) a obrigatoriedade de medição do contaminante legionella em edifícios com produção de aerossóis (torres de arrefecimento, etc.) ou sistemas AQS (Águas Quentes Sanitárias) com temperatura abaixo de 60°C, incluindo amostragens de *Legionella* (<100 UFC) e o radão como elemento radioactivo de avaliação obrigatória em Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu, Castelo Branco e outras localizações onde os edifícios sejam construídos em solos graníticos.

Tabela 1.1: Concentrações máximas regulamentares dos parâmetros de medição da QAI (extraído de [3]).

Parâmetros	Concentração medida	Concentração máxima de referência
Partículas Suspensas no Ar		0,15 mg/m <sup>3</sup>
Dióxido de Carbono		1800 mg/m <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono		12,5 mg/m <sup>3</sup>
Ozono		0,2 mg/m <sup>3</sup>
Formaldeído		0,1 mg/m <sup>3</sup>
Compostos Orgânicos Voláteis		0,6 mg/m <sup>3</sup>
Microrganismos -bactérias		500 UFC
Microrganismos - fungos		500 UFC
Legionella (*)		100 UFC
Radon (*)		400 Bq/m <sup>3</sup>

(\*) se aplicável.

Os contaminantes previstos no RSECE [3], nomeadamente partículas, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> (Ozono), formaldeído, COV's, microrganismos e radão podem caracterizar-se pelo seu aspecto, via de exposição, risco de inalação, efeitos de curta duração e efeitos com exposição repetida e prolongada. A existência de elevada concentração de CO<sub>2</sub> deve-se à permanência de elevadas taxas de ocupação em espaços com uma ventilação ineficiente. O CO<sub>2</sub> pode ser absorvido por inalação, pelo que caso existam zonas confinadas, rapidamente se atinge a saturação total do ar, com grave risco de asfixia. Os efeitos de inalação de altas concentrações durante um período de curta duração pode resultar em hiperventilação e perda de conhecimento, e durante uma exposição prolongada ou repetida pode afectar a taxa de metabolismo.

De acordo com a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Standard 62.1:2004 [9], no âmbito do controlo e monitorização do O<sub>3</sub> exterior, os equipamentos de limpeza do ar, devem ser instalados quando o segundo valor de concentração máxima diária exceder 0.160 ppm durante uma hora. Os equipamentos deverão ter uma eficiência mínima de remoção de 40% e deverão operar sempre que se prever que os valores de concentração de O<sub>3</sub> exterior irão ultrapassar o valor de 0.160 ppm. Fora do âmbito de aplicação encontra-se um sistema de ventilação que não exceda uma taxa de renovação do ar de 1.5 ren/h ou seja previsto um controlo que monitorize o nível de O<sub>3</sub> exterior e reduza a taxa de renovação do ar para valores inferiores a 1.5 ren/h.

As fontes de geração de CO, como resultado da combustão de combustíveis podem ser garagens, esquentadores, fumo de tabaco, fogões e lareiras. As causas que levam a um aumento da sua concentração são uma ventilação deficiente e uma inadequada extracção. As suas características incolores, inodoras e insípidas, revelam num período curto de exposição, efeitos imediatos no sangue, no sistema cardiovascular e no sistema nervoso central. A exposição a altas concentrações pode produzir diminuição de consciência e morte. Os efeitos de exposição prolongada ou repetida podem afectar o sistema nervoso e o sistema cardiovascular originando alterações neurológicas e cardíacas.

As concentrações de  $O_3$  interiores podem resultar de fontes exteriores e/ou de fontes interiores como fotocopiadoras e impressoras, representando o perigo de oxidar e reagir violentamente com materiais combustíveis e redutores. O  $O_3$  apresenta uma natureza incolor, com odor característico, com efeitos a nível de exposição de curta duração nos seres humanos, de irritação ocular, problemas respiratórios, edema pulmonar e reacções asmáticas. Os efeitos de exposição prolongada repetida resultam em problemas pulmonares.

As concentrações de formaldeído cuja origem remota à existência de matérias plásticas, aglomerados de madeira, solventes de lacas e resinas, apresentam como sintomas nas pessoas, forte irritação na pele, nos olhos e vias respiratórias. O formaldeído com aspecto de gás de odor característico apresenta o perigo de facilmente se misturar com o ar, formando facilmente uma mistura explosiva. Ao ocorrer uma fuga deste gás, rapidamente é atingida uma concentração nociva no ar levando numa exposição repetida e prolongada a problemas cancerígenos. Os COV's resultantes de materiais de decoração, mobiliários, alcatifas, materiais de construção (cimento, colas, tintas e madeiras) e produtos de consumo de higiene e limpeza, são hidrocarbonetos que se volatizam e concentram-se no fígado, placenta e medula óssea após inalação, causando náuseas e efeitos nocivos a longo prazo, como leucemias, cancro da pele e pulmão.

As partículas são provenientes do fumo do tabaco, lareiras e materiais de construção civil. As partículas mais finas podem transportar substâncias tóxicas, tais como sulfatos, nitratos, metais pesados e hidrocarbonetos para as vias respiratórias atingindo os alvéolos pulmonares, provocando dificuldades respiratórias e por vezes danos permanentes.

A utilização de um gás traçador como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) proveniente do processo respiratório dos ocupantes pode ser um bom indicador da qualidade do ar interior. A introdução de ar novo para a diluição das emissões poluentes interiores numa sala, quando contemplada na equação de diluição sob a forma de taxa de renovação, permite a inflexão da concentração de  $CO_2$  para níveis aceitáveis de conforto térmico. A relação entre o  $CO_2$  e o caudal volúmico de ar novo releva o conceito físico da variação da concentração de  $CO_2$  na razão inversa do caudal de renovação de ar exterior [10].

A utilização da equação de concentração ou equação de diluição pressupõe a homogeneização da concentração de  $CO_2$  no volume da sala num determinado instante de tempo, para um caudal volúmico de ventilação constante. A Figura 1.1 representa um modelo simplificado de um local com ventilação mecânica sujeita uma fonte de poluição G. Em regime estacionário, a concentração de poluentes num determinado espaço, depende das emissões de poluentes G nesse espaço e da sua ventilação  $q_v$  nomeadamente no que diz respeito ao caudal de ar novo insuflado e do ar exaurido, e da qualidade do ar exterior insuflado com uma concentração  $C_0$ .

Através de um simples balanço de caudais volúnicos e concentração de poluentes, conforme esquematizado na Figura 1.1, a equação de concentração toma a forma (1.1), com G

a assumir a geração de CO<sub>2</sub> no espaço,  $q_v$  [m<sup>3</sup>/h] o caudal volúmico de ventilação,  $C_i$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>ar] a concentração de CO<sub>2</sub> no interior,  $C_o$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>ar] a concentração de CO<sub>2</sub> inicial na insuflação,  $G$  [m<sup>3</sup>/h], a produção de CO<sub>2</sub> devido a ocupação e  $V$  [m<sup>3</sup>] o volume do espaço.

$$V_{\text{espaço}} \frac{d}{dt}(C_i) = (-q_v(-C_o + C_i)) + G \quad (1.1)$$

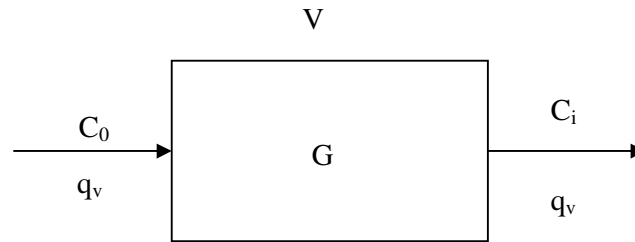


Figura 1.1: Esquema do balanço de caudais volúnicos e concentrações de poluentes.

De forma a proporcionar aos ocupantes dos espaços interiores uma qualidade do ar que permita assegurar a saúde, o conforto e o desempenho normal das suas funções, é necessário monitorizar e controlar a concentração de poluentes interiores  $C_i$  dos espaços [11]. A redução da concentração de CO<sub>2</sub> para valores regulamentares [3], deverá acarretar contudo uma análise económica-energética na concepção do método e sistema de ventilação a adoptar.

A leitura matemática de (1.1) permite adoptar três estratégias que individualmente ou em conjunto possibilitam o controlo da concentração de poluentes, destacando o controlo na fonte, a diluição e a remoção.

O controlo na fonte pretende reduzir a concentração de poluentes nos espaços interiores através do controlo da potência das fontes emissoras dos poluentes. O objectivo é conseguido através da redução, ou mesmo eliminação das fontes poluentes ou das suas emissões  $G$  do seu interior. Como exemplo enuncia-se a “lei do tabaco” como medida governamental imposta através do cumprimento regulamentar da proibição de fumar em espaços públicos e serviços [12]. Outro exemplo é a substituição de materiais de construção, revestimento e decoração por materiais mais “limpos” (materiais de baixa emissão de poluentes). Caso não seja possível a adopção de materiais “limpos”, o RSECE [3] estabelece que: “*Em espaços de não fumadores em que sejam utilizados materiais de construção ou de acabamento ou revestimento não ecologicamente limpos, os sistemas de renovação do ar em novas instalações de climatização sujeitas aos requisitos do presente Regulamento devem ser concebidos para poderem fornecer, se necessário, caudais aumentados em 50% relativamente aos correspondentes referidos no n.º 1, por forma a garantir as concentrações máximas de referência de poluentes indicadas no n.º 8 do presente artigo durante o funcionamento normal do edifício.*”

O nº 1 referido na anterior citação define os caudais de ar novo mínimos necessários para as diferentes actividades conforme a Tabela 1.2, privilegiando a situação mais desfavorável entre o caudal de ar mínimo de acordo com o número de ocupantes, ou no caso de desconhecimento do respectivo número, o valor por área útil (no caso da sala de aula não são apresentados valores na Tabela 1.2). Os valores de caudais mínimos de ar novo definidos deverão ser avaliados de acordo com os métodos de ventilação adoptados, em conformidade com a eficácia de ventilação.

Os valores de caudais mínimos de ar novo podem ser obtidos em conformidade com a prENV1752:1997 [13], a ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e o RSECE [3], embora prevaleça o critério regulamentar nacional da aplicação do RSECE [3].

A prENV1752:1997 [13] prevê a consideração de diferentes valores de caudais mínimos de ar novo de acordo com uma área útil associada a uma densidade ocupacional, pelo que para uma sala de aula considera-se um caudal de ventilação de ar novo de 5 l/s.m<sup>2</sup> e uma densidade ocupacional de 0.5 pessoa/m<sup>2</sup>, perfazendo cerca de 10 l/s.pessoa. A ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] no âmbito da qualidade do ar interior, estabelece dois critérios da qualidade do ar interior. O método da taxa de ventilação e o método da qualidade do ar. O método de taxa de ventilação estabelece através da equação (1.2), o caudal de ar novo a insuflar na zona da respiração. A determinação do caudal de ar novo requer o conhecimento prévio da ocupação máxima previsível  $P_Z$  no espaço e da área da zona  $A_Z$ . Os valores de  $R_P$  e  $R_A$  para o tipo de sala de aula em estudo (> 9 anos) são respectivamente 5 l/s.pessoa e 0.6 l/s.m<sup>2</sup>.

$$V_{\text{resp}} = R_P P_Z + R_A A_Z \quad (1.2)$$

O método da qualidade do ar interior estabelece os valores limites de concentração de CO<sub>2</sub> mediante o cálculo da taxa de ventilação através da equação (1.3), considerando o caudal volúmico de ventilação  $q_v$  [m<sup>3</sup>/h], como resultado do quociente entre a geração de CO<sub>2</sub>, designado por  $G$  [lCO<sub>2</sub>/h], e a diferença entre a concentração de CO<sub>2</sub> interior  $C_i$  e a concentração exterior  $C_e$ .

$$q_v = \frac{G}{(C_i - C_e)} \cdot 1000 \quad (1.3)$$

O RSECE [3] por sua vez considera um caudal mínimo de ar novo de aproximadamente 8.3 l/s.pessoa, conforme a Tabela 1.2.



Todos os caudais mínimos de ar novo estudados anteriormente devem contudo ser afectados por valores de eficácia de ventilação derivada da estratificação do ar, ou contemplação de outros poluentes gerados de forma independente da ocupação.

O n.º 8 da citação anterior corresponde ao cumprimento dos valores máximos regulamentares expressos na Tabela 1.1.

Tabela 1.2: Caudais mínimos de ar novo de acordo com o RSECE para cada tipo de actividade (extraído de [3]).

ANEXO VI Caudais mínimos de ar novo			
Tipo de actividade		Caudais mínimos de ar novo	
		[m³/(h.ocupante)]	[m³/(h.m²)]
Residencial .....	Salas de estar e quartos .....	30	
Comercial .....	Salas de espera .....	30	
	Lojas de comércio .....		5
	Áreas de armazenamento .....		5
	Vestiários .....		10
	Supermercados .....	30	5
Serviços de refeições .....	Salas de refeições .....	35	
	Cafetarias .....	35	35
	Bares, salas de <i>cocktail</i> .....	35	35
	Sala de preparação de refeições .....	30	
Empreendimentos turísticos .....	Quartos/suites .....	30	
	Corredores/átrios .....		5
Entretenimento .....	Corredores/átrios .....		5
	Auditório .....	30	
	Zona do palco, estúdios .....	30	
	Café/ <i>foyer</i> .....	35	35
	Piscinas .....		10
	Ginásio .....	35	
Serviços .....	Gabinets .....	35	5
	Salas de conferências .....	35	20
	Salas de assembleia .....	30	20
	Salas de desenho .....	30	
	Consultórios médicos .....	35	
	Salas de recepção .....	30	15
	Salas de computador .....	30	
	Elevadores .....		15
Escolas .....	Salas de aula .....	30	
	Laboratórios .....	35	
	Auditórios .....	30	
	Bibliotecas .....	30	
	Bares .....	35	
Hospitais .....	Quartos .....	45	
	Áreas de recuperação .....	30	
	Áreas de terapia .....	30	

O controlo por diluição encontra-se intrinsecamente ligado à ventilação, onde através da insuflação de ar novo  $q_v$  com uma  $C_e$  inferior ao interior do espaço, permite a substituição de parte do ar poluído que sai por exaustão promovendo uma redução global da concentração interior.

O controlo por remoção consiste numa limpeza dos poluentes do ar interior. Este método encontra-se associado à eficiência de filtragem  $\varepsilon_f$  conforme a Figura 1.2, com o intuito de diminuir a concentração de poluentes do ar de insuflação  $C_0$ , ou seja tornar sempre  $C_0 < C_i$ . De forma a garantir uma correcta remoção dos poluentes, deverá ser assegurada uma manutenção preventiva adequada e periódica ao sistema de filtragem.

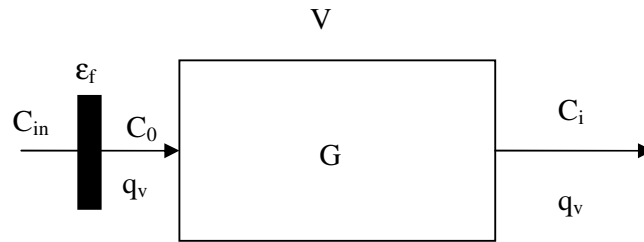


Figura 1.2: Esquema do balanço de caudais volúmicos e concentrações de poluentes com eficiência de filtragem.

Os balanços de caudais de ar entre o interior e o exterior dos edifícios podem ser efectuados através de três métodos, destacando as infiltrações, método de ventilação natural e método de ventilação forçada. Nas infiltrações, a troca de ar ocorre de uma forma não intencional promovida pelas forças de pressão dinâmica e térmicas, verificando-se através de frinchas ou interstícios na envolvente do edifício em contacto com o exterior. Trata-se portanto de um processo de ventilação não controlado e indesejado, associado por conseguinte a defeitos de estanqueidade do edifício.

A ventilação natural ocorre de um processo de troca de ar por meios naturais, por gradientes de pressão e/ou temperatura, sem consumo de energia para promover o escoamento de ar. Trata-se de um processo intencional de troca de ar através de janelas, portas ou outro tipo de aberturas criadas propositadamente na envolvente do edifício para o efeito. A ventilação natural embora satisfaça as necessidades de renovação do ar para controlo higiénico, pode não conseguir reagir às elevadas cargas térmicas dos edifícios, impossibilitando a garantia das condições higrométricas para conforto humano.

A ventilação mecânica ocorre de um processo intencional de troca de ar entre o interior e o exterior, originado por um ventilador que insufla e/ou extrai o ar do interior do espaço através de meios de regulação de caudal, ou temperatura ou humidade relativa. A ventilação mecânica assume nos edifícios, uma responsabilidade pelo controlo da qualidade do ar, pelas condições higrométricas e conforto térmico. A garantia das condições higrométricas pode movimentar um caudal de ar cerca de 10 vezes superior aos valores recomendados para o controlo da qualidade de ar interior. Desta forma por razões económicas aplica-se o método de recirculação, existindo contudo soluções alternativas com vantagem em termos de QAI. As alternativas englobam a aplicação, em determinados períodos do dia ou do ano, de ventilação natural e no caso de se adoptar expressamente ventilação mecânica, a utilização de unidades de recuperação de energia entre o ar de exaustão e o ar novo de insuflação.



5 - Registo do Caudal de Exaustão	10 - Ventilador de Insuflação
6 - Bateria de Aquecimento	11 - Ventilador de Exaustão
7 - Bateria de Arrefecimento	12 - Módulo de Atenuação Acústico
8 - Módulo de Humidificação	13 - Ligação à Rede de Conduitas
9 - Bateria de Reaquecimento	

A utilização do módulo de recirculação numerado por 4 na Figura 1.3, pretende a redução do consumo de energia quer no modo de aquecimento, quer no modo de arrefecimento, através da mistura do ar exterior com parte do ar de extracção. A poupança de energia ocorre na medida em que parte do ar insuflado já se encontrar nas condições de temperatura e humidade relativa pretendidas (ar extraído), sendo apenas necessário aquecer ou arrefecer o restante ar (exterior) para as condições de higrométricas exigidas. A modelação dos registos de caudal da recirculação, através de um balanço energético entre o caudal de retorno e o caudal de ar novo, pode ocorrer em resposta a exigências energéticas ou em resposta às exigências da qualidade de ar interior através da monitorização de sensores de concentração de CO<sub>2</sub> na zona de ocupação. Em termos energéticos e para as condições climáticas de Portugal, este efeito de arrefecimento gratuito é mais eficaz na estação de arrefecimento.

De forma a garantir uma eficiência energética sem afectar a qualidade ar interior recorre-se à utilização de um recuperador de calor com transferência de energia térmica do caudal de exaustão para o caudal de ar novo, numerado por 3 na Figura 1.3. A troca energética pode ocorrer sem contacto físico (troca de calor sensível) ou com contacto físico (troca de calor sensível e latente), representando este último um novo potencial foco de poluição do ar novo pelo de extracção. Pelo RSECE [3], *é obrigatório o recurso à recuperação de energia no ar de rejeição, na estação de aquecimento, com uma eficiência mínima de 50 %, ou recuperação de calor equivalente, sempre que a potência térmica de rejeição em condições de projecto seja superior a 80 kW, excepto nos casos em que seja demonstrada em projecto a não viabilidade económica da sua instalação.* A recuperação de calor é essencialmente eficaz na estação de aquecimento. O permutador deverá contudo incluir a situação de funcionamento no modo de Bypass, proporcionado o “free cooling”, pelo que, nos *“sistemas de climatização do tipo «tudo ar», com um caudal de ar de insuflação superior a 10 000 m<sup>3</sup>/h, é obrigatória a instalação de dispositivos que permitam o arrefecimento dos locais apenas com ar exterior quando a temperatura ou a entalpia do ar exterior forem inferiores à do ar de retorno, excepto nos casos em que seja demonstrada a não viabilidade económica da sua instalação”,* RSECE [3].

A recirculação de ar normalmente contém partículas e outros poluentes que podem ser removidos através dos filtros. O módulo de filtragem, numerado com 2 na Figura 1.3 é normalmente constituído por dois tipos de filtros distintos: filtros de baixa eficiência, denominados por pré-filtros com o principal objectivo de recolher as partículas de maior dimensão e os filtros de eficiência superior, com capacidade de reter as partículas respiráveis e

outros poluentes. As baterias de aquecimento e/ou arrefecimento, com os números 6 e 7 da Figura 1.3 são atravessadas por fluxos de ar de forma a garantir determinadas condições higrométricas na insuflação. As serpentinas da bateria de arrefecimento podem funcionar com o fluido água fria proveniente de centrais de produção de água gelada denominadas por chillers ou com fluido frigorígeno oriundo de sistemas de volume de fluido frigorígeno variável. As serpentinas da bateria de aquecimento podem funcionar com água quente oriundas de um chiller bomba de calor e/ou caldeiras, ou vapor de água através de caldeiras, ou ainda com fluido frigorígeno proveniente de sistemas de volume de fluido frigorígeno variável. As baterias de arrefecimento podem desempenhar o papel de desumidificadores, com a condensação da água contida no ar após contacto na sua superfície arrefecida. Os condensados que escoam para o painel de condensados colocados por baixo da bateria deverão ser encaminhados através de um sifão para o esgoto, caso contrário, a estagnação dos condensados no tabuleiro podem vir a constituir um ambiente propício ao desenvolvimento de microrganismos, constituindo alvo de arrastamento por gradiente de pressão e contaminação do ar de insuflação.

Num processo ideal de arrefecimento com desumidificação, todo o ar que entra na bateria de arrefecimento, é arrefecido até à temperatura da sua superfície. Numa fase primordial o ar húmido arrefece até à sua temperatura de orvalho e atinge o estado saturado. A continuação do processo de arrefecimento do ar leva a que o ar perca o conteúdo mássico em vapor, ocorrendo a condensação. Na realidade nem todo o ar entra em contacto com a superfície da bateria, pelo que o ponto de saída resulta num balanço mássico entre o caudal de ar que entra em contacto com a bateria de arrefecimento e o caudal que não sofreu qualquer alteração por não ter entrado em contacto com a superfície da bateria, encontrando-se associado um factor de contacto da bateria. Outro parâmetro que apresenta relevância no processo de arrefecimento com desumidificação é a obtenção da linha da sala num diagrama psicrométrico. Estando relacionado com a carga térmica da sala, o FCS (Factor de Calor Sensível) da sala representa a razão entre o calor sensível da sala e o calor total da mesma. Caso o FCS seja baixo, o processo de arrefecimento num diagrama psicrométrico não intersecta a linha da sala, sendo necessário recorrer à bateria de reaquecimento. Aplicando a mesma metodologia na obtenção da linha da sala para a situação de Inverno, caso o FCS apresente um valor elevado então o aquecimento não intersecta a linha da sala, sendo necessária uma humedificação. A secção de humedificação, representado pelo n.º 8 da Figura 1.3, é normalmente utilizado em climas mais frios quando o ar exterior é aquecido para atingir as condições higrométricas de conforto. Os humedificadores de vapor utilizam água sem quaisquer aditivos, de forma a não constituir uma nova fonte de poluição para os ocupantes. Outro tipo de humedificadores podem ser de “spray”, no entanto necessitam de uma manutenção regular de forma a prevenir a contaminação de microrganismos.

O percurso do ar desde o exterior até ao interior do espaço, inicia com a sua entrada na UTA (Unidade de Tratamento de Ar) onde é filtrado, aquecido ou arrefecido, humedificado ou desumidificado e movimentado através de um ventilador de insuflação, representado pelo n.º

10 na Figura 1.3, que insufla o ar para a rede de condutas com pressão estática suficiente para vencer as perdas de carga em linha e acessórios dos troços. O motor do ventilador pode estar instalado no interior do sistema e em contacto com o ar insuflado ou preferencialmente no exterior, sem contacto com o fluxo de ar, reduzindo as possíveis emissões de poluentes oriundas das correias e engrenagens do motor.

O último módulo, antes de o ar atravessar as condutas para posterior insuflação através dos elementos terminais de difusão de ar, é designado por atenuador acústico, representado pelo n.º 12 da Figura 1.3, com a função de redução do nível de ruído propagado por transmissão a sons aéreos e vibração, provocados pela passagem do ar nas condutas e acessórios, e pelos elementos mecânicos constituintes.

A rede de condutas, com o objectivo da distribuição do caudal de ar pelos diversos espaços a climatizar ou ventilar, é normalmente construída em chapa de aço galvanizado revestido exteriormente por isolamento térmico. Os troços de condutas por sua vez devem ter registos manuais ou automáticos para controlo e equilíbrio de caudais.

É de notar que com a nova regulamentação (RSECE), tem de ser instalado um novo filtro ou alterada a posição do Filtro 2 alusivo na Figura 1.3 para jusante do atenuador acústico.

De uma forma geral todos os componentes do sistema de AVAC, deverão ser construídos em materiais isentos de interstícios, de forma a poder efectuar-se primordialmente um controlo na fonte, facilitando a limpeza e evitando o depósito de impurezas.

### *1.3.2 Filtros de ar*

O sistema de filtragem desempenha funções de remoção dos poluentes do ar, minimizando os efeitos negativos que a permanência dos poluentes no espaço provoca na saúde e conforto dos ocupantes. Por outro lado garante a protecção dos componentes do sistema de AVAC, do edifício e dos equipamentos, minimizando a deposição dos poluentes nas suas superfícies, que de outra forma poderiam tornar-se focos de contaminação.

Para uma “limpeza” correcta do ar, é necessário remover as partículas, os microrganismos e os poluentes gasosos, através da utilização de filtros de partículas e filtros de gases.

Típicas análises ao ar indicam que 90% das partículas presentes na atmosfera tem dimensão inferior a  $1\ \mu\text{m}$  [14]. Dado que são consideradas respiráveis, apresentam maior preocupação no que diz respeito ao seu efeito negativo.

No processo de retenção de partículas pelos filtros de ar destacam-se entre vários métodos, a remoção por “esforço” onde as partículas de maior dimensão, são retidas através de uma membrana com orifícios de dimensão inferior à dimensão das partículas a serem retidas e o método por efeitos electrostáticos onde a carga eléctrica quer das partículas, quer do meio filtrante pode produzir alterações na retenção das partículas.

Os filtros de partículas podem agrupar-se de acordo com o tipo de meio filtrante que usam, destacando os filtros de meio filtrante fibroso e filtros electrónicos. Os filtros de meio filtrante fibroso podem distinguir-se por meio filtrante seco (sob a forma de filtros planos ou filtros de saco ou em V, constituído por materiais de fibra de vidro, fibras celulósicas, feltros sintéticos ou sob a forma de filtros de elevada eficiência HEPA (High Efficiency Particulate Air) e ULPA (Ultralow Penetration Air) com aplicações de sala limpas e aplicações com partículas tóxicas) e filtros com meio filtrante viscoso (sob a forma de pré-filtros nos sistemas de ar condicionado, constituído por materiais de fibras grossas de elevada porosidade, essencialmente com aplicação de retenção de partículas de maior dimensão). Os filtros electrónicos utilizam a precipitação electrostática para a remoção das partículas poluentes como o pó, fumo e pólen. A secção de ionização consiste numa descarga eléctrica sobre filamentos de tungsténio com corrente continua entre 6 e 25 kV, carregando positivamente as partículas do fluxo de ar que ao encontrarem outras partículas poluentes polarizam-nas. Ao atravessar um conjunto de placas paralelas e alternadamente polarizadas ou não, as partículas são forçadas a colidir, ficando retidas. Como todos os equipamentos que trabalham com tensões elevadas produzem O<sub>3</sub>, logo deve ser considerada uma correcta manutenção, de forma a manter a geração deste poluente em concentrações mínimas aceitáveis em conformidade com a Tabela 1.1 [3].

A CEN (Comité Européen du Normalisation) é a instituição para Portugal e para a União Europeia que normaliza os testes para a caracterização do desempenho de filtros de partículas, através da norma CEN EN779 [15] para os filtros de baixa e média eficiência, e a norma CEN EN1822 [16] para os filtros de elevada eficiência ou absolutos.

Para o caso de filtros de baixa eficiência, a norma CEN EN779:2002 [17] determina a eficiência dos filtros grossos por ensaio gravimétrico com poeira padronizada, e a eficiência dos filtros finos em relação à retenção de partículas de 0.4 µm produzidas por dispersão de aerossol líquido. As classes de filtros de média e baixa eficiência estão representadas na Tabela 1.3.

Tabela 1.3: Classificação de filtros de partículas de acordo com a EN 779:2002 (extraído de [17]).

Tipo de Filtros	Classe	Eficiência gravimétrica média Eg [%]	Eficiência média para partículas de 0.4 µm Ef [%]
<b>Grossos</b>	G1	50≤Eg≤65	-
	G2	65≤Eg≤80	-
	G3	80≤Eg≤90	-
	G4	90≤Eg	-
(Continua na página seguinte)			

<b>Tipo de Filtros</b>	<b>Classe</b>	<b>Eficiência gravimétrica média <math>E_g</math> [%]</b>	<b>Eficiência média para partículas de <math>0.4 \mu m</math> <math>E_f</math> [%]</b>
<b>Finos</b>	F5	-	$40 \leq E_f \leq 60$
	F6	-	$60 \leq E_f \leq 80$
	F7	-	$80 \leq E_f \leq 90$
	F8	-	$90 \leq E_f \leq 95$
	F9	-	$95 \leq E_f$

Os filtros com eficiência média das partículas ( $E_f$ ) superiores a 95 % são denominados por filtros absolutos. Na Norma CEN EN1822 [16] os filtros absolutos podem ser filtros HEPA ou ULPA designados respectivamente pelas letras H e U. A Tabela 1.4 apresenta as várias classificações dos filtros para uma eficiência global.

Tabela 1.4: Classificação de filtros de elevada eficiência de acordo com a EN 779:2002 (extraído de [17]).

<b>Classe de Filtro</b>	<b>Eficiência Global [%]</b>
<b>H10</b>	85
<b>H11</b>	95
<b>H12</b>	99.5
<b>H13</b>	99.95
<b>H14</b>	99.995
<b>U15</b>	99.9995
<b>U16</b>	99.99995
<b>U17</b>	99.999995

Os princípios de remoção das fontes de poluentes gasosos através de filtros de gases para filtragem de odores e COV's em ambientes interiores resumem-se à absorção, adsorção física e adsorção química. A absorção consiste no princípio de que os poluentes gasosos são absorvidos por líquidos quando a pressão parcial de vapor do poluente na corrente gasosa é superior à pressão de vapor do mesmo poluente na solução. Os poluentes gasosos são dissolvidos no meio filtrante absorvente, ou reagem com este, podendo ser um sólido poroso ou líquido. A eficiência dos absorventes líquidos pode contudo ser melhorada através da adição de reagentes, no entanto em espaços com ocupantes o ar tende a ficar saturado com o vapor do líquido absorvente, tornando-se ele próprio uma potencial fonte poluente. Na situação em que o líquido absorvente é a água, a humidade relativa pode aumentar para níveis de desconforto térmico.



A adsorção física é um fenómeno de superfície idêntico a uma condensação, onde as moléculas do poluente gasoso quando embatem na superfície ficam retidas por algum tempo. Existem dois processos para aumentar a capacidade de adsorção de uma superfície, consistindo numa primeira fase na adopção de adsorventes na forma granular ou na forma de fibras de forma a aumentar a área de contacto entre o meio adsorvente e a corrente gasosa e uma segunda fase, sendo a superfície adsorvente tratada de forma a ter poros microscópicos, aumentando a área de contacto molecular. As superfícies são tipicamente de alumina tratada ou activada ou carvão activado.

A adsorção química tem aspectos idênticos à adsorção física no entanto para que as moléculas permaneçam retidas na superfície adsorvente é necessário que exista uma reacção química entre o poluente e o adsorvente químico através da troca de electrões.

### 1.3.3 Classificação do ar exterior

O ar exterior é categorizado em 3 níveis, tendo em conta a norma EN13779 [18], focando a Tabela 1.5 apenas a concentração de CO<sub>2</sub> exterior.

Tabela 1.5: Categoria do ar exterior segundo EN13779 (extraído de [18]).

Descrição da Qualidade do Ar	Nível de Concentração CO <sub>2</sub> [ppm]	Categoria do Ar Exterior
Áreas rurais	350	ODA 1
Cidades pequenas	400	ODA 2
Centro de cidades	450	ODA 3

### 1.3.4 Classificação do ar interior

A norma EN13779 [18] prevê igualmente uma classificação para o ar interior entre IDA 1 (Boa qualidade de ar interior) e IDA4 (Baixa qualidade de ar interior).

O método tradicional, embora limitado, de determinação da qualidade do ar interior é o estudo das concentrações de CO<sub>2</sub>. Note-se que caso existam outros poluentes que não dependam do nível de ocupação, os caudais de ar novo podem ser muito superiores, podendo eventualmente duplicar no caso de existência de materiais não ecologicamente limpos conforme o RSECE [3]. O CO<sub>2</sub> contudo é um indicador da eficácia de ventilação mas não da qualidade absoluta do ar. A Tabela 1.6 apresenta uma classificação da qualidade do ar interior em função dos níveis de concentração de CO<sub>2</sub> atingidas no interior relativamente à concentração exterior.

Tabela 1.6: Categoria do ar interior segundo EN13779 (extraído de [18]).

<b>Categoria do Ar Interior</b>	<b>Descrição Qualidade do Ar</b>	<b>Nível de concentração CO<sub>2</sub> acima da Concentração exterior [ppm]</b>
IDA 1	Boa	≤ 400
IDA 2	Média	400-600
IDA 3	Moderada	600-1000
IDA 4	Baixa	>1000

Após a categorização da qualidade do ar interior e exterior, a EN13779 [18] especifica a classe de filtros necessária a adequar para garantir uma qualidade de ar pretendida. A classe de filtros é especificada de acordo com a EN779:2002 [17]. A Tabela 1.7 representa para um nível de qualidade exterior OD3 (centro da cidade) e uma qualidade interior entre boa e média, a necessidade de se adoptar um filtro de carbono combinado com os filtros F7 e F9, podendo eventualmente em caso de zonas industrializadas ou proximidade a aeroportos recorrer-se a filtros electrónicos.

Tabela 1.7: Classificação dos filtros segundo EN13779 (extraído de [18]).

<b>Categoria do Ar Exterior</b>	<b>Qualidade do Ar Interior</b>			
	<b>IDA 1 (Alta)</b>	<b>IDA 2 (Média)</b>	<b>IDA 3 (Moderada)</b>	<b>IDA 4 (Baixa)</b>
<b>ODA 1</b>	F9	F8	F7	F5
<b>ODA 2</b>	F7+F9	F6+F8	F5+F7	F5+F6
<b>ODA 3</b>	F7+GF <sup>*</sup> +F9	F7+GF <sup>*</sup> +F9	F5+F7	F5+F6

A utilização de pré-filtros na entrada das unidades de ventilação permitem reduzir a entrada de partículas e poeiras, mantendo os componentes do sistema de climatização limpos. A consideração de um pré-filtro permite igualmente aumentar o prazo de substituição do segundo filtro, aumentando contudo os custos de instalação e manutenção da secção de filtragem. No caso de apenas existir um nível de filtragem, este deve ser colocado a jusante do ventilador evitando a libertação de partículas (partículas de óleo e correias) para o interior. Em situações com mais de 2 secções de filtragem, estas devem ser colocadas respectivamente antes do sistema de climatização e no final do mesmo.

Os filtros do primeiro nível, por questões higiénicas, não devem operar por períodos superiores a um ano e os filtros do segundo e terceiro nível, por períodos superiores a 2 anos.

---

<sup>\*</sup> Filtro de Gases (filtro de carbono) e/ou filtro químico

### 1.3.5 Tomadas de ar novo

No que se refere à instalação do sistema de climatização, é importante definir o local das tomadas de ar novo, pelo que o mesmo deve ser obrigatoriamente no exterior do edifício. Na Tabela 1.8 apresentam-se as distâncias mínimas para as tomadas de ar de alguns exemplos de aplicação.

Relativamente às saídas de exaustão de ar, estas deverão estar colocadas a uma altura superior aos edifícios vizinhos com um valor mínimo indicativo de 2 metros para ar mais poluído ou com cheiro forte.

Tabela 1.8: Distâncias de localização das tomadas de ar novo.

<b>Exemplo de Aplicação</b>	<b>Distância Mínima [m]</b>
Entradas de garagens	10
Pontos de recolha de lixo	20
Respiradouros de esgotos e saídas de chaminés	
Relativamente ao solo	2.5

### 1.3.6 Métodos de ventilação

A caracterização da forma como o ar é introduzido, como escoar no interior e como é removido do espaço define-se como a distribuição do ar. A forma como é efectuada a ventilação no espaço interior influencia a distribuição do ar, afectando a eficácia de ventilação ou a garantia do alcance de ar novo na zona de ocupação. Desta forma apresentam-se três formas de escoamento: ventilação por mistura, cruzado e deslocamento.

A Figura 1.4 e Figura 1.5 representam em planta, o escoamento de ar no método de ventilação de mistura e cruzado, considerando o eixo ortogonal de referência no lado direito com Y como sendo a altura do espaço. A Figura 1.6 representa o plano de corte vertical do método de deslocamento.

No método de mistura representado pela Figura 1.4, o caudal de ar é insuflado na sala através de grelhas de insuflação no caso de superfícies verticais com proximidade ao tecto, com velocidades superiores aos valores aceitáveis na zona de ocupação, onde o termo difusivo da equação do momento resulta na ausência de direcção do escoamento de ar e da diluição com o ar do interior da sala. O processo de diluição agiliza uma distribuição de temperatura e poluentes no campo espacial e o efeito “curto-circuito” derivado de uma insuflação e retorno ao mesmo nível, promove a diminuição da capacidade térmica e do potencial de diluição de poluentes (eficácia de ventilação), originado zonas de recirculação com baixo momento e elevado tempo de residência de poluentes.

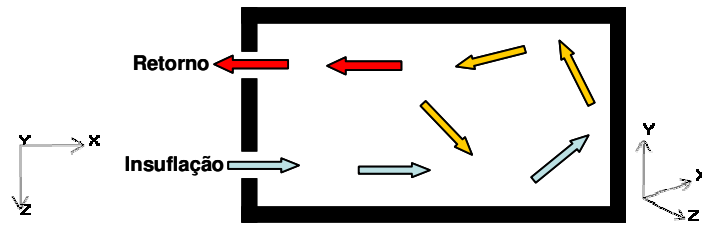


Figura 1.4: Exemplo do método de mistura no plano de corte horizontal XZ.

O método Cruzado apresentado na Figura 1.5 caracteriza-se por uma conservação do momento mais elevada comparativamente à estratégia abordada anteriormente, dado que o caudal de ar percorre livremente a sala de topo a topo. Em aplicações industriais adopta-se esta estratégia devido aos elevados caudais mássicos que são necessários transportar. Este método associa uma ineficácia de ventilação, essencialmente em condições idênticas às referenciadas no método de ventilação por mistura.

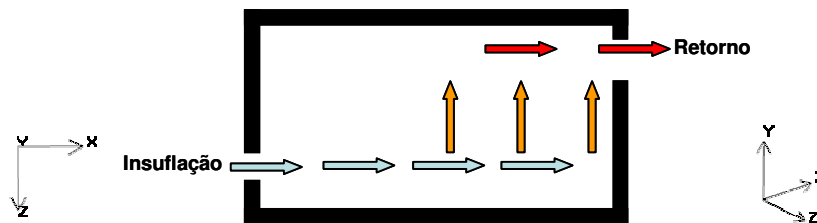


Figura 1.5: Exemplo do método cruzado no plano de corte horizontal XZ.

No método de ventilação por deslocamento apresentado na Figura 1.6, o escoamento de ar é caracterizado por baixos fluxos verticais e horizontais de momento, com um escoamento vertical devido à pluma térmica provocado pelas cargas internas. A capacidade de aquecimento ou arrefecimento encontra-se limitada pela natureza das condições térmicas da insuflação do ar. A concentração espacial dos poluentes não é uniforme, assegurando a separação de poluentes acima da zona ocupada.

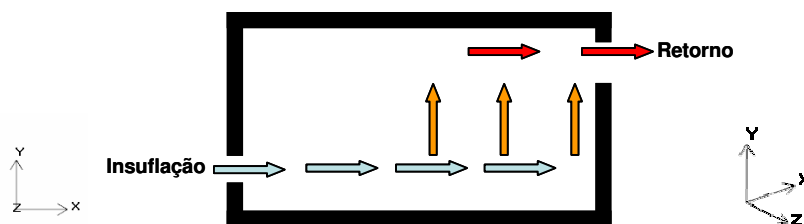


Figura 1.6: Exemplo do método de deslocamento no plano de corte vertical XY.

## 1.4 Motivação

A indubitável necessidade de garantia dos parâmetros (conforto térmico humano, qualidade de ar interior e eficiência energética) que sustentam o enquadramento legal do RSECE [3], extrapolam a procura de sistemas activos de climatização energeticamente mais eficientes, e a recorrência de métodos e/ou soluções de difusão de ar, que melhor satisfaçam as necessidades requisitadas numa visão económico-energética.

O aperfeiçoamento e melhoria das condições interiores do conforto humano, da qualidade do ar interior e da eficiência energética apenas são conseguidos através de estudos experimentais ou simulações numéricas. Os trabalhos de campo ou experimentais permitem estudar e demonstrar a eficácia de técnicas, podendo inclusive ajudar a desenvolver estudos aprofundados dos fenómenos que estão na base de cada técnica, para produzir modelos físico-matemáticos. Os trabalhos de simulação numérica são utilizados para estudar as técnicas ou métodos que em condições experimentais seriam economicamente ou temporalmente incomportáveis ou desvantajosas. A simulação numérica recorre contudo aos resultados de trabalhos experimentais, quer utilizando modelos físico-matemáticos previamente validados, quer para a sua validação através da comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais. No entanto o desenvolvimento tecnológico apenas se consegue através de sinergias destes dois campos de trabalho.

O desenvolvimento e aumento da capacidade de processamento dos computadores elevaram a importância da utilização de ferramentas de cálculo numérico, criando novos campos de aplicação e capacidade de previsão. Com um desenvolvimento acentuado, novas técnicas numéricas têm sido adaptadas às novas potencialidades.

As condições definidas nas normas e regulamentos que regem os estudos de qualidade de ar e conforto térmico, por muito próximas que estejam da realidade geral, não conseguem fornecer uma análise detalhada das diferentes variáveis que modelam o escoamento no interior de um espaço, nos diferentes pontos de localização dos ocupantes. Desta forma as condições previstas nas normas e regulamentos podem não reproduzir totalmente a realidade que se pretende, pelo que pode resultar como objecto de estudo a sua aplicação e avaliação do seu comportamento em diversos métodos de ventilação.

A simulação numérica surge igualmente como ferramenta para estudar a optimização do escoamento de ar e simular condições reais de funcionamento que experimentalmente seriam difíceis de reproduzir, possibilitando simular diversas situações num intervalo de tempo curto e sem os encargos habituais associados aos estudos experimentais.

O motivo de elaboração da tese prende-se com alguma experiência anterior do autor em simulação numérica aplicada à mecânica de fluidos em escoamentos incompressíveis em disciplinas da licenciatura, e o interesse na transferência de tecnologia para outras áreas de investigação. A integração dos conhecimentos de climatização aliado ao surgimento de regulamentos como o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico

dos Edifícios) [5] e RSECE [3] e a utilização de valores padronizados nas normas [9] e [13], torna aliciante o trabalho de simular três diferentes metodologias de ventilação, prevendo as eficácias de ventilação para os diferentes casos de estudo. Desta forma torna-se possível otimizar energeticamente e economicamente o sistema de climatização, mantendo os padrões de qualidade e ar interior.

## 1.5 Objectivos

O objectivo da tese pretende a simulação numérica da qualidade do ar e conforto térmico numa sala de aula com uma ocupação de 6 pessoas sentadas e 1 pessoa de pé.

Para se atingir o objectivo é necessário efectuar uma calibração do nosso modelo numérico de acordo com a equação de diluição e adaptá-lo às condições de funcionamento pretendidas. Simula-se numa sala de aula três métodos de ventilação, nomeadamente o método de mistura, o método cruzado e o método de deslocamento com diferentes técnicas de redução das concentrações locais de CO<sub>2</sub>, onde se destaca a optimização das vias de insuflação dos elementos terminais de difusão de ar e o incremento do caudal de ar novo.

Pretende-se igualmente verificar o cumprimento regulamentar do RCCTE [5] e RSECE [3] com base nos resultados numéricos obtidos de velocidade e temperatura do ar, distribuição da concentração de CO<sub>2</sub>, idade média do ar e trajectória de partículas. Relativamente ao conforto térmico pretende-se uma análise ao índice de voto médio previsível designado na nomenclatura inglesa por índice PMV (Predicted Mean Vote), e a percentagem de pessoas insatisfeitas designado pela nomenclatura inglesa como índice PPD (Predicted Percentage Dissatisfied).

Após a adaptação e desenvolvimentos do modelo, pretende-se a aplicação da simulação numérica como complemento ao Projecto de RSECE [3] de forma a garantir a qualidade do ar interior associada ao padrão de poupança energética por minimização do efeito de agravamento de caudal de ar novo por eficácia de ventilação comparativamente aos valores padronizados na prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9].

## 1.6 Revisão bibliográfica

### 1.6.1 Introdução

A secção da revisão bibliográfica pretende apresentar alguns artigos que contribuíram para o desenvolvimento da tese ou que enquadrem o leitor na temática do estudo.

Foram consultados artigos paralelos à temática, no entanto dado as suas conclusões revelarem menor importância para o presente estudo, não são referidos nesta secção.

A revisão dos artigos pretende enquadrar o leitor numa evolução temporal dos conteúdos e tecnologias inerentes de duas a três décadas anteriores ao nível dos modelos de turbulência com aplicação a ambientes interiores.

A revisão bibliográfica encontra-se dividida em duas partes distintas. Na primeira parte apresenta-se o estudo sobre a evolução temporal, quadros comparativos dos diversos modelos de turbulência aplicados a ambientes interiores de forma a compreender o seu âmbito de aplicação e a justificação na selecção do modelo de turbulência para o modelo numérico. Na segunda parte expõem-se alguns artigos relacionados com o tema da simulação da qualidade do ar e conforto térmico interior, que promoveram o desenvolvimento e melhoria da tese em novos campos de abordagem.

### *1.6.2 Perspectiva histórica dos modelos de turbulência*

No último século, a maioria das aplicações CFD para modelação de ambientes interiores resolviam escoamentos padrão e distribuições de velocidade e temperatura do ar, intensidade de turbulência e gases contaminantes. Nielsen em 1976 [19] foi o primeiro a aplicar CFD para a modelação de um ambiente interior. Os estudos de CFD a partir de 1970 eram simplesmente aplicados a casos de 2 dimensões e resolviam as equações de Navier-Stokes, utilizando os modelos Eddy-Viscosity, enquanto o modelo de turbulência k- $\epsilon$  standard de Launder e Spalding em 1974 [20] se tornavam mais populares. Entre 1980 e 1990 as aplicações de CFD para modelação de ambientes interiores estendiam-se para casos tridimensionais, contudo os modelos k- $\epsilon$  standard mantinham a sua popularidade, enquanto em 1990 os modelos de Re-Normalization Group k- $\epsilon$  emergiam.

Os modelos Reynolds Stress eram ocasionalmente utilizados, contudo tinham um conteúdo físico sólido, sendo matematicamente complicados e numericamente instáveis, necessitando além disso de um elevado tempo de processamento computacional.

Chen entre 1995 e 1996 [21] [22] avaliou o desempenho de cinco modelos Eddy-Viscosity e três modelos Reynolds Stress para escoamentos interiores. Os modelos de Eddy-Viscosity incluíam o modelo k- $\epsilon$  Standard com base nos estudos de Launder e Spalding em 1974 [20], o modelo Low Reynolds Number LB k- $\epsilon$  Standard de Lam e Bremhorst em 1981 [23], o modelo duas camadas 2L k- $\epsilon$  de Rodi em 1991 [24], o modelo dois escalares 2S k- $\epsilon$  de Kim e Chen em 1989 [25] e o modelo RNG k- $\epsilon$  de Yakhot em 1992 [26]. Modelos com isotropização de produção Reynolds Stress (RSTM-IP e RSTM-GY) de Gibson [27] e Younis em 1986, Malin e Younis em 1990 [28] e modelos aproximados quasi-isotrópicos (RSTM-QI) de Launder em 1975 [29] foram igualmente alvos de estudo.

A análise de Chen entre 1995 e 1996 [21] [22] representada na Tabela 1.9 enuncia o estudo de oito modelos de turbulência aplicados em escoamentos interiores de convecção natural, convecção forçada, convecção mista e velocidade imposta.

Os modelos k- $\epsilon$  Standard e RNG k- $\epsilon$  apresentaram resultados fiáveis, com uma performance do modelo RNG k- $\epsilon$  ligeiramente superior.

Os três modelos Reynolds-Stress (RSTM) apresentaram resultados muito similares, não demonstrando melhorias significativas em relação ao modelo k- $\epsilon$  Standard, além de requerer maior dispêndio de tempo no processamento computacional.

Tabela 1.9: Performance dos modelos de Eddy-Viscosity e Stress-Reynolds testados por Chen (1995, 1996) (extraído de [21] [22]).

Casos	Itens	k- $\epsilon$	LB k- $\epsilon$	2L k- $\epsilon$	2S k- $\epsilon$	RNG k- $\epsilon$	RSTM -IP	RSTM -GY	RSTM -QI
<b>Convecção Natural</b>	Vel. Média	B	A	B	B	B	B	B	B
	Turbulência	C	C	D	D	C	C	C	C
	Temperatura	B	D	B	B	B	B	B	B
	Transferência Calor	C	B	A	C	C	C	C	C
<b>Convecção Forçada</b>	Vel. Média	C	C	C	F	C	C	C	C
	Turbulência	D	D	D	D	D	D	D	D
<b>Convecção Mista</b>	Temperatura	A	A	C	A	A	A	A	A
<b>Velocidade Imposta</b>	Vel. Média	C	C	C	A	A	B	B	B
	Turbulência	D	D	D	C	C	D	D	D
<b>A = Bom, B = Aceitável, C = Marginal, D = Pobre, F = Inaceitável</b>									

No presente, devido às melhorias nos modelos de turbulência, na capacidade de processamento e memória dos computadores, as aplicações de CFD para escoamentos interiores evoluíram para modelos mais avançados como o LES (Large Eddy Simulation) de Emmerich e McGrattan em 1998 e Jiang e Chen em 2001 [30] [31].

No sentido de reduzir o tempo de computação, modelos simplificados de turbulência demonstram resultados razoavelmente assertivos como é o caso do modelo Zero-Equation de Chen e Xu em 1998 [32].

O estudo de Zhang em 2007 [33] é apresentado na Tabela 1.10 com a análise comparativa dos diferentes escoamentos interiores: Convecção natural de Betts e Bokhari em 2000 [34], Convecção forçada de Ito em 2000 [35], a Convecção mista de Blay em 1992 [36] e o escoamento com turbulência elevada no interior de um espaço de Murakami em 1995 [37] com aplicação dos modelos indoor zero-equation (0-eq.) de Chen e Xu datado de 1998 [32]. Outros modelos como o RNG k- $\epsilon$  model de Yakhot de 1992 [26], o modelo SST k- $\omega$  (SST) de Menter em 1994 [38], o modelo low Reynolds number k- $\epsilon$  (LRN-LS) de Launder e Sharma em 1974 [39], o modificado modelo v2f (v2f-dav) de Davidson datado de 2003 [40], o modelo Reynolds stress (RSM-IP) de Launder de 1975 [29], o modelo LES com sub-malha dinâmica (SGS) de



Germano e Lilly, de respectivamente, 1991 e 1992 [41] [42] e o modelo DES de Shur de 1999 [43], foram igualmente alvos de estudo.

Tabela 1.10: Performance dos modelos de turbulência testados por Zhang (extraído de [33]).

Casos	Itens	0-Eq	RNG k-ε	SST k-ε	LNR k-ε	V2f -dav	RSM- IP	DES	LES
Convecção Natural	Temp. Média	B	A	A	C	A	A	-	A
	Vel Média	D	B	A	B	A	B	-	B
	Turbulência	N/A	C	C	C	A	C	-	A
Convecção Forçada	Vel. Média	C	A	C	A	A	B	-	A
	Turbulência	N/A	B	C	B	B	B	-	B
Convecção Mista	Temp. Média	A	A	A	A	A	B	B	A
	Vel. Média	A	B	B	B	A	A	B	B
	Turbulência	N/A	A	D	B	A	A	B	B
Escoamento com Elevada Turbulência	Temp. Média	A	A	A	A	A	N/A	-	B
	Vel. Média	B	A	A	A	A	N/A	-	A
	Turbulência	N/A	C	A	B	B	N/A	-	B
Tempo de Processamento de dados	Unidade relativa de comparação	1	2-4		4-8		10-20	100-1000	
A = Bom, B = Aceitável, C = Marginal, D = Pobre, F = Inaceitável									

### ***Justificação do modelo de turbulência indoor zero equation***

A Tabela 1.10 perspectiva a análise pretendida no sentido de adoptar o modelo de turbulência para a resolução das equações de Navier-Stokes no motor de cálculo FLUENT®. Efectivamente o modelo que apresenta melhor performance é o RNG k-ε, contudo o modelo v2f-dav apresenta melhor precisão, mas com maior dispêndio de tempo de computação em cerca de 4 a 8 vezes superior. O modelo Reynolds Stress apresentou problemas na convergência da solução.

Os modelos LES e DES apresentam a informação mais detalhada do escoamento, no entanto com um tempo de cálculo até 1000 vezes superior a outros modelos e com alguma incoerência na precisão.

O modelo *indoor zero equation* embora menos preciso relativamente aos outros modelos converge rapidamente para a solução numérica.

A selecção do modelo numérico a adoptar no motor de cálculo, depende efectivamente das aplicações pretendidas. Como exemplo de aplicações sugere-se o modelo LES e DES para estudo de escoamento de ventilação natural, o modelo RNG k-ε para estudos generalizados de ambientes interiores enquanto o modelo v2f necessita de uma análise mais profunda.

A selecção do modelo de turbulência assentou no compromisso razoável entre a precisão de valores obtidos para o estudo em causa e o tempo de cálculo dispendido, pelo que a opção

convergiu no modelo *indoor zero equation* que apresenta uma rápida previsão do escoamento e transporte de contaminantes. O modelo zero equation traz consigo a enorme vantagem de responder de forma simples e com elevado grau de confiança às necessidades de um utilizador com modestos recursos computacionais.

### 1.6.3 Simulação numérica em qualidade do ar interior e conforto térmico

No trabalho de Chou [44] é apresentado uma análise à qualidade do ar interior e conforto térmico considerando um modelo com uma concentração inicial de CO<sub>2</sub>, sem geração de espécies, efectuando estudos experimentais e simulações numéricas com aplicação de diversas técnicas de insuflação de ar. Os resultados numéricos avaliam o comportamento da temperatura e CO<sub>2</sub>, resultando numa nota positiva ao nível da qualidade do ar interior e poupança energética com a aplicação de uma tecnologia de insuflação de ar pelo solo. No entanto é enfatizado a importância da localização das grelhas de insuflação na obtenção de uma correcta distribuição do ar e uma boa eficácia de ventilação.

Num estudo encomendado pela PIER (Public Interest Energy Research) [45], é apresentado uma análise CFD exclusivamente sobre o método de ventilação por deslocamento em sala de aula com condições definidas no modelo numérico incluindo a existência de ocupantes com geração de CO<sub>2</sub>. A pretensão resulta na avaliação dos parâmetros necessários para obtenção de níveis satisfatórios de conforto térmico. O estudo inclui uma análise do caudal necessário para a climatização, a temperatura de insuflação, a localização e configuração dos elementos de difusão de ar. A análise CFD surge como ferramenta na determinação das condições necessárias para manter o conforto térmico nas piores condições de projecto, considerando a influência da altura do tecto. O modelo de turbulência adoptado é o *indoor zero equation*, desenvolvido para simulações de escoamento interiores e validado através do autor Srebic em 1999. Para estudar o efeito da altura do tecto, foram desenvolvidas duas simulações, uma com uma altura de 2.8 metros e outra com uma altura de 3.8 metros. Nestas simulações dadas as cargas térmicas serem as mesmas, foi considerado o mesmo caudal de insuflação. Os resultados numéricos revelaram que aumentando a altura do tecto para 3.8 metros a temperatura global decresce, no entanto o gradiente térmico entre o solo e o tecto não é afectado de uma forma significativa. Torna-se interessante que o incremento no volume do espaço em cerca de um metro na altura do tecto, com o mesmo caudal de insuflação, conduz a uma redução da temperatura na zona ocupada em 1°C. Desta forma a altura do tecto embora não seja um requisito, reduz a energia de arrefecimento necessária para manter o “setpoint” ou o valor de temperatura pretendida de arrefecimento na zona de ocupação.

Os resultados numéricos prevêem igualmente o número e a localização de elementos de difusão de ar por deslocamento de acordo com os gradientes horizontais e verticais de

temperatura. Neste estudo assumiram-se apenas dois difusores de insuflação ao nível da parede em contacto com o solo, sendo os mesmos localizados num ponto oposto ao retorno. Cada difusor permite a insuflação em cerca de metade do caudal total necessário a insuflar. Como conclusão geral, a utilização de dois difusores é a quantidade mínima a utilizar, baseando-se no critério de minimizar o gradiente horizontal de temperatura perto do solo. À medida que nos afastamos da insuflação, verifica-se ao nível do solo um ligeiro aumento da temperatura. Desta forma, um aumento do número dos difusores e uma distribuição homogénea dos mesmos levam a uma redução do gradiente térmico do solo por toda a área de ocupação e igualmente uma redução do gradiente vertical de temperaturas. Com o aumento do número de difusores, consequentemente o caudal a insuflar em cada um deles é reduzido, extrapolando uma redução global do caudal total a insuflar, dado que um factor chave para o dimensionamento do caudal de ar de insuflação é a minimização do gradiente de temperatura. Dados experimentais mostram que o caudal total de ar a insuflar pode ser reduzido em cerca de 10 a 15% com quatro difusores invés de dois.

Outro estudo de particular interesse, por Sebric [46], é a modelação dos elementos terminais de difusão de ar, apresentando no seu trabalho modelações simplificadas para difusores de insuflação complexos como micro-injectores, injectores, difusores para o método de deslocamento, grelhas e difusores radiais quadrados. O objectivo do estudo pretende encontrar métodos simplificados que possam ser utilizados para descrever as características de um difusor ou uma grelha. A investigação utiliza dois métodos. O método da caixa e o método do momento. Os dados experimentais correspondentes de escoamento e distribuição de temperatura foram utilizados para validar os métodos numéricos. Infelizmente a maior dificuldade e/ou impossibilidade para a modelação é que a maioria dos difusores e grelhas são muito pequenos em comparação à dimensão dos espaços, apresentando elevadas velocidades de escoamento. Os requisitos para a modelação de um escoamento no interior de um elemento de difusão de ar de forma a prever as características de saída do escoamento são muito diferentes e por vezes incompatíveis com os requisitos para a modelação do mesmo escoamento no interior do espaço. Devido às geometrias complexas dos difusores, a modelação real é a única forma de simular na prática a entrada no difusor, a passagem por ele e a saída. A modelação do escoamento desta forma pode ser teoricamente possível, no entanto os códigos que são eficazes e estão disponíveis para a modelação de escoamentos interiores não são capazes de modelar o escoamento num elemento terminal de difusão de ar. A maior parte das simulações em escoamentos interiores utilizam modelos simplificados derivado a este problema. Como resultado muitos investigadores identificaram a modelação de escoamentos provenientes dos elementos terminais de difusão como o maior factor limitativo na aplicação de CFD em escoamentos interiores [47], [48], [49], [50], [51].

Estudos mais recentes focalizados nesta matéria sugeriram potenciais soluções para este problema. Foram comparadas duas técnicas de modelação do escoamento de difusores, incluindo a modelação directa de um difusor e a modelação do escoamento padrão num volume em frente ao difusor (Método da Caixa) [52]. O método da caixa consiste na modelação

de diversas áreas de controlo (insuflação) com balanços mássicos associados. O método do momento resulta na aplicação de um ângulo de saída na insuflação, criando um momento e desvio da trajectória por efeito *cuonda* [52].

Os resultados experimentais obtidos permitiram de forma conclusiva a validação dos métodos da caixa e momento no modelo numérico. Desta forma as simulações numéricas dos difusores podem aplicar uma técnica simplificada de modelação através da utilização dos dois métodos referidos anteriormente sem uma representação detalhada da geometria do difusor. Para o método do momento será apenas necessário conhecer previamente os dados do caudal de insuflação, a velocidade e temperatura de insuflação e concentração de contaminantes. O método do momento é mais simplificado que o método da caixa em termos de esforços para especificar os dados para a modelação. O método do momento é o método recomendado para difusores em ventilações do tipo mistura e deslocamento que insuflam jactos combinados. No caso de Injectores, micro injectores que insuflam vários fluxos e posteriormente convergem deve adoptar-se o método da caixa.

## 1.7 Contribuição da tese

Na literatura encontram-se diversos estudos de simulação numérica de qualidade do ar interior e conforto térmico. Muitos estudos são simulações de espaços para diversas aplicações como hotéis, transportes, escritórios, com o objectivo de validação dos modelos numéricos com os seus valores experimentais.

Os artigos relacionados com o tema da simulação da qualidade do ar e conforto térmico interior promoveram o desenvolvimento e melhoria desta tese em novos campos de abordagem. Destacam-se a simulação numérica na optimização e avaliação do ângulo de insuflação dos elementos de difusão de ar como método de melhoria da eficácia de ventilação. A comparação detalhada dos diversos métodos de ventilação com aplicação de técnicas de melhoria de eficácia de ventilação. A verificação e comparação entre a norma prENV1752:1997 [13], ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e o cumprimento do RSECE [3] e do RCCTE [5] com base nos resultados numéricos obtidos de velocidade e temperatura do ar, distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> e idade média do ar e trajectória de partículas. Relativamente à avaliação do conforto térmico efectuou-se uma análise ao índice de voto médio previsível (Índice PMV) e percentagem de pessoas insatisfeitas (Índice PPD). Desta forma, o estudo apresentado, resulta de uma forma geral como um contributo importante relativamente aos trabalhos encontrados na literatura.

## 1.8 Organização da dissertação

O trabalho desenvolvido durante a elaboração da tese encontra-se detalhado nos cinco capítulos que a compõem.

O primeiro capítulo contém uma introdução ao tema e um enquadramento da temática da sua importância como objecto de estudo, e as técnicas de melhoria das condições de qualidade interior e conforto humano. Apresenta-se a motivação, os objectivos, uma revisão da pesquisa bibliográfica e uma descrição da organização da dissertação.

O segundo capítulo apresenta a modelação matemática e numérica utilizada, destacando a modelação do conforto térmico e do grau de insatisfação. São apresentados os valores padronizados de eficácia de ventilação das normas prENV1752:1997 [13] e ASHRAE 62.1:2004 [9] para posterior análise e comparação aos valores obtidos numericamente.

O terceiro capítulo baseia-se na implementação do caso de estudo, com o recurso ao cálculo das cargas térmicas para definição das condições de funcionamento do modelo numérico, e à determinação da concentração de CO<sub>2</sub> através da simulação da geração de CO<sub>2</sub> do processo respiratório. Apresenta-se igualmente as considerações assumidas na calibração do modelo com a injeção de CO<sub>2</sub> e a taxa de renovação de ar novo, e as metodologias de ventilação adoptadas.

O quarto capítulo apresenta os resultados das simulações numéricas da calibração da injeção de CO<sub>2</sub> e dos diversos métodos de ventilação com a optimização do ângulo de insuflação e o aumento do caudal de ar novo por eficácia de ventilação. Serão analisadas as assimetrias verticais na proximidade dos ocupantes e apresentados os quadros comparativos dos valores numericamente obtidos com os valores padronizados das normas prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9].

O quinto capítulo diz respeito às conclusões gerais da presente tese.

No sexto capítulo apresentam-se os possíveis desenvolvimentos futuro a partir do trabalho desenvolvido, a implementar brevemente.

A estrutura da tese pretende que cada capítulo seja independente, com as conclusões mais importantes sempre que possível no seu final, promovendo ao leitor uma leitura mais agradável e interessante. Apresenta-se nos diversos capítulos desenvolvidos, as referências aos capítulos onde se obteve a informação, encaminhando o leitor de forma ordeira e lógica para a compreensão da tese.



# 2 Modelação matemática e numérica

## 2.1 Análise CFD

Os métodos de CFD são baseados em aproximações numéricas das equações de estado Navier-Stokes de conservação de massa, conservação de energia, conservação de momento e conservação de espécies (no caso estudo de geração de  $\text{CO}_2$ ).

O domínio do escoamento é dividido em pequenas células denominadas volumes de controlo, constituindo a malha computacional, onde as equações de Navier-Stokes são discretizadas pelo método de volumes finitos (método implícito).

Em cada célula de controlo, é obtida a equação de conservação na sua forma algébrica por integração das equações diferenciais nos volumes finitos (processo de discretização, método de volumes finitos). As equações algébricas são resolvidas de uma forma iterativa de forma a devolver os campos de valores das variáveis dependentes em cada célula computacional.

Os dados obtidos resultam numa solução numérica incluindo a distribuição das velocidades e temperaturas do ar e distribuição de pressão e concentração de espécies.

A arquitectura de geração e imagem do modelo numérico é apresentada através da Figura 2.1.

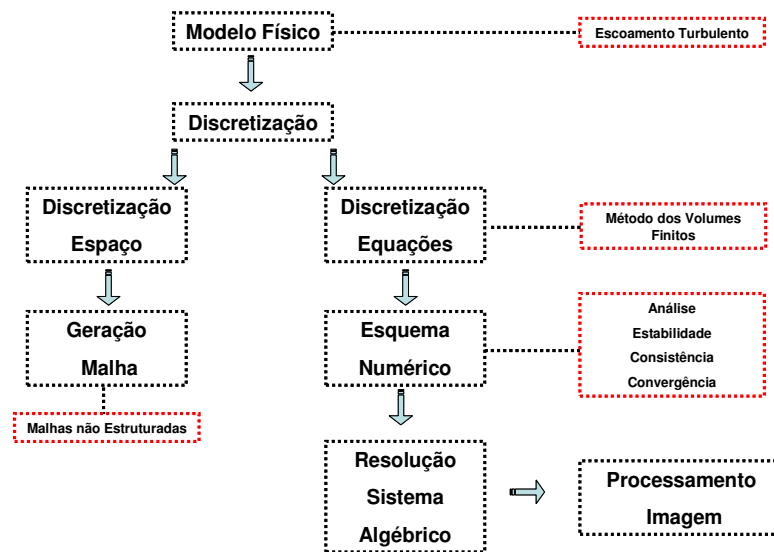


Figura 2.1: Arquitectura de geração do modelo numérico no FLUENT®.

### 2.1.1 Convenções matemáticas

Define-se nesta secção algumas convenções matemáticas adoptadas para simplificação de equações matemáticas.

As quantidades vectoriais são representadas sempre que possível com uma seta em cima ( $\vec{b}, \vec{B}$ ) e o termo  $I_{ID}$  representa a matriz identidade.

O operador  $\nabla$  representa a derivada parcial de uma quantidade nas respectivas direcções do sistema de coordenadas definido. Em coordenadas cartesianas pode ser reescrito em (2.1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (2.1)$$

O gradiente de uma quantidade escalar é o vector cujas componentes são as derivadas parciais, dado por (2.2).

$$\nabla p = \frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \quad (2.2)$$

O gradiente de uma quantidade vectorial em coordenadas cartesianas é dado por (2.3), sendo contudo escrito normalmente na forma de (2.4).

$$\nabla(\vec{v}) = \left( \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) (v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}) \quad (2.3)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

A divergência da quantidade vectorial, caracterizado pelo produto interno entre  $\nabla$  e o vector é dado por (2.5).

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (2.5)$$



O operador  $\nabla \cdot \nabla$ , escrito normalmente como  $\nabla^2$ , é conhecido como Laplaciano, conforme demonstrado em (2.6).

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

A expressão  $\nabla^2 T$  difere da expressão  $(\nabla T)^2$ , sendo definida em (2.7).

$$(\nabla T)^2 = \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \quad (2.7)$$

Neste capítulo o leitor encontra uma exceção à utilização do termo  $v$  invés do convencional  $\vec{v}$ , onde na equação (2.11) toma a particularidade de decompor a velocidade nas suas componentes vectoriais, designadas por  $u$ ,  $v$  e  $w$ .

### *2.1.2 Equações de estado*

As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento de um fluido e resultam da aplicação da 2ª Lei de Newton para o movimento juntamente com a tensão do fluido que resulta dos termos difusivos viscosos (proporcionais aos gradientes de velocidade) e do termo pressão. A solução numérica obtida das equações de Navier-Stokes resulta no campo de escoamento ou velocidade, descrevendo a velocidade do fluido num determinado ponto no espaço e no tempo. A partir da obtenção do campo de velocidade é possível obter outras quantidades como os gradientes de pressão ou fluxos mássicos.

As equações Navier-Stokes são resolvidas para o transporte de massa, momento, espécies e energia para escoamentos laminares com transferência de calor. Equações de transporte adicionais são resolvidas quando o escoamento é turbulento ou quando a troca de calor por radiação é incluída.

### *Equação de conservação da massa*

A equação para a conservação da massa, ou equação da continuidade, pode ser escrita através da equação (2.8).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.8)$$

### *Equações do momento*

O transporte do momento num quadro de referência inercial (sem aceleração) é descrito por (2.9).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.9)$$

Onde  $\vec{v}$  é a componente vectorial da velocidade,  $p$  a pressão estática,  $\bar{\bar{\tau}}$  o termo tensor de tensões viscosas e  $\rho \vec{g}$  a força gravitacional.  $\vec{F}$  representa o termo fonte a adicionar ao transporte como (fontes de poluentes ou resistências). O primeiro termo do lado esquerdo da equação descreve a aceleração, com dependência do tempo e dos efeitos convectivos. O segundo termo do lado esquerdo da equação representa a aceleração convectiva, resultando no tensor derivado do vector velocidade numa quantidade não linear, sem dependência do factor tempo. O lado direito da equação representa o efeito composto pelas forças gravitacionais e a divergência da tensão (pressão e tensão).

A derivação das equações de Navier-Stokes é iniciada com a aplicação da 2ª Lei de Newton ao movimento do fluido juntamente com a consideração de que a tensão do fluido é composta pelo termo de viscosidade difusiva (proporcional ao gradiente de velocidade) e pelo termo pressão.

O efeito da tensão no fluido é representado pelos termos  $\nabla p$  e  $\nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}$ . Estes valores são gradientes de forças de superfície resultando numa dinâmica de fluidos. O termo  $\nabla p$  é designado por gradiente de pressão e aumenta a partir da parte isotrópica da tensão, transformando-se em movimento ou não. A parte anisotrópica da tensão é dada pelo termo  $\nabla(\bar{\bar{\tau}})$ , que descreve o efeito das forças viscosas. O termo do tensor de tensões viscosas  $\bar{\bar{\tau}}$  é dado por (2.10). O gradiente de pressão efectivamente é o termo mais representativo com o escoamento de ar a deslocar-se no sentido do ponto de maior pressão para o ponto de menor pressão.

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I_D \right] \quad (2.10)$$

Onde  $\mu$  representa a viscosidade molecular,  $I_D$  a matriz identidade da tensão e o segundo termo da equação representa o efeito da dilatação de volume.

A equação em (2.9) pode ser reescrita nas três componentes cartesianas, conforme (2.11).

$$\begin{aligned} \text{Componente x: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \rho f_x \\ \text{Componente y: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \rho f_y \\ \text{Componente z: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \rho f_z \end{aligned} \quad (2.11)$$

### *Equação de conservação da energia*

A equação de energia para um fluido pode ser escrita em termos de entalpia sensível  $h = \left( \int_{T_{ref}}^T C_p dT, \text{ com } T_{ref} = 298.15 \text{ K} \right)$  na forma (2.12).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{V}) = \nabla \cdot [(k + k_t) \nabla T] + S_h \quad (2.12)$$

Onde  $k$  representa condutividade molecular,  $k_t$  a condutividade devido ao transporte turbulento ( $k_t = C_p \mu_t / Pr_t$ ), e o termo fonte  $S_h$  inclui as fontes de calor volumétrico definidas (incluindo a transmissão de calor por radiação).

A condução térmica no domínio sólido é resolvida por uma equação simplificada (2.13), que inclui o fluxo térmico devido à condução e fontes de calor volumétrico no elemento sólido.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (2.13)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica,  $k$  a condutividade,  $T$  a temperatura e  $S_h$  a fonte de calor volumétrico.

A equação dada em (2.13) é resolvida em simultâneo com a equação de transporte e energia (2.12) no domínio de escoamento para obtenção de uma previsão acoplada de transferência de calor por condução e convecção.

### *Equação de transporte de espécies*

Quando se pretende resolver as equações de conservação para as espécies, é previsto uma fracção mássica de cada espécie  $Y_i$ , através da solução da equação de convecção-difusão para  $i$  espécies, dada por (2.14). O termo convectivo da equação afecta a distribuição da quantidade transportada na direcção do escoamento e o termo difusivo afecta a distribuição da quantidade transportada em todas as direcções.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J} + S_i \quad (2.14)$$

$S_i$  é a taxa resultante da adição de fontes definidas. A equação descrita nesta forma, é resolvida para  $N-1$  espécies, onde  $N$  é o número total de espécies presentes no domínio do fluído. O termo  $\vec{J}$  representa o fluxo difusivo das espécies  $i$ , que aumenta derivado ao gradiente de concentrações.

Para o regime turbulento, é utilizado o modelo aproximado de diluição, podendo a difusão mássica em regime turbulento ser escrito na seguinte forma (2.15).

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i \quad (2.15)$$

Onde  $D_{i,m}$  representa o coeficiente difusivo das espécies  $i$  na mistura e  $Sc_t$  é o número de turbulência de Schmidt,  $\mu_t / \rho D_t$  com o valor de referência de 0.7.

O tratamento das espécies na equação de energia revela que em escoamentos mistos multicomponentes (ex. Geração de  $CO_2$  e vapor de água libertado no ciclo de respiração), o transporte de entalpia derivado da difusão de espécies introduzidas pode ter um efeito significativo no campo de entalpia em (2.16), em particular se o número de Lewis é divergente da unidade, pelo que deve ser incluído no cálculo em (2.17). Por defeito é incluído na natureza do cálculo:

$$\nabla \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (h_i) \vec{J}_i \right] \quad (2.16)$$

$$Le_i = \frac{k}{\rho C_p D_{i,m}} \quad (2.17)$$

### 2.1.3 Modelação da turbulência (indoor zero equation)

O modelo de turbulência usado para definir o termo da viscosidade turbulenta  $\mu_t$ , obtido através da equação (2.18), é o *indoor zero equation*, dado ser especificamente adaptado à simulação de escoamentos interiores.

$$\mu_t = 0.03874 \rho \nu L \quad (2.18)$$

Onde  $\nu$  é a magnitude da velocidade,  $\rho$  a massa específica do fluído,  $L$  a distância até à parede mais próxima e 0.03874 uma constante empírica.

A transferência de calor nas superfícies das condições fronteira é determinado através da determinação do coeficiente de convecção enunciado em (2.19).

$$h_c = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\text{Pr}_{\text{eff}}} \frac{C_p}{\Delta x_j} \quad (2.19)$$

Onde o  $C_p$  representa o calor específico do fluído,  $\text{Pr}_{\text{eff}}$  o número efectivo de Prandtl e  $\Delta x_j$  o espaçamento de malha adjacente à parede. Define-se a viscosidade dinâmica efectiva em (2.20) como sendo a soma da viscosidade molecular com uma viscosidade turbulenta.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (2.20)$$

### 2.1.4 Impulsão e flutuabilidade

A importância das forças de impulsão num escoamento de convecção misto pode ser medido pelo quociente entre o número de Grashof e o número de Reynolds dado por (2.21), com o valor  $\beta$  representado pelo coeficiente de expansão térmica em (2.22).

$$\frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} = \frac{g\beta\Delta T L}{\nu^2} \quad (2.21)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.22)$$

Quando o quociente  $\frac{Gr}{Re^2}$  diverge positivamente da unidade, o contributo da impulsão é elevado, contrariamente quando o valor converge para valores aproximadamente nulos, onde as forças de impulsão podem ser ignoradas.

### *Lei de gases ideais incompressíveis*

A massa específica é determinada através da utilização da expressão (2.23), onde R representa a constante de gás universal e  $p_{op}$  definida neste estudo como pressão atmosférica de 101325 Pa. Escrita nesta forma, a massa específica apenas depende da pressão operativa e não do campo de pressão relativa local, campo de velocidade e peso molecular.

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M}T} \quad (2.23)$$

A massa específica operativa  $\rho_0$  aparece no termo da força gravitacional, na equação do momento, dada por (2.24). A forma do termo da força gravitacional é reescrita por redefinição da pressão em (2.25) e o balanço hidrostático do fluido em repouso é dado por (2.26).

$$(\rho - \rho_0)g \quad (2.24)$$

$$p'_s = p_s - \rho_0 g x \quad (2.25)$$

$$p'_s = 0 \quad (2.26)$$

### *2.1.5 Modelação da radiação*

O termo radiativo da transferência de calor e da radiação térmica são geralmente utilizados para descrever a transferência de calor causada pelas ondas electromagnéticas. A globalidade dos materiais emite e absorvem continuamente ondas electromagnéticas ou fótons. O período e o comprimento de onda da emissão dependem da temperatura do material emissivo. A uma temperatura absoluta de zero K, nenhuma radiação é emitida de uma superfície. Para aplicações de transferência de calor, os comprimentos de onda mais importantes e que geralmente são considerados nos cálculos, são aqueles que se encontram no espectro infra-vermelho.

Enquanto a condução e convecção necessitam de meio de propagação, a radiação térmica não o requer, atravessando consequentemente vastos comprimentos sem meio de interação. Para a maioria das aplicações, a transferência de calor por condução e convecção é linearmente proporcional às diferenças de temperatura, enquanto a radiação térmica é proporcional às diferenças de temperatura de ordem à quarta.

### *Radiação difusa cinzenta*

O modelo de radiação previsto considera as superfícies cinzentas e difusas. A emissividade e absorvidade de uma superfície cinzenta são independentes do comprimento de onda. Pela Lei de Kirchhoff em [53], para um dado comprimento de onda, a emissividade ( $\epsilon$ ) dum corpo é igual à sua absorvidade ( $\alpha$ ).

Para uma superfície difusa, a reflectividade é independente da direcção de chegada ou saída da radiação. A troca de energia por radiação entre superfícies não é afectada pelo meio de propagação, pelo que de acordo com o modelo de corpo cinzento, uma certa quantidade de radiação ( $E$ ) é incidida numa superfície, uma fracção ( $\rho E$ ) é reflectida, uma fracção ( $\alpha E$ ) é absorvida e uma fracção ( $\tau E$ ) é transmitida. No modelo de estudo, consideram-se todas as superfícies interiores opacas à radiação térmica no espectro infra-vermelho, diferindo os envidraçados na temperatura da sua superfície interior com um valor superior às restantes envolventes interiores. Desta forma o contributo da transmissividade no cálculo é desprezável. Da equação de conservação de energia obtêm-se  $\alpha + \rho = 1$ , com  $\alpha = \epsilon$  e  $\rho = 1 - \epsilon$ .

### *Equação de transferência radiativa*

A equação de transferência radiativa para a absorção, emissão e dispersão do meio na posição  $\vec{r}$  e direcção  $\vec{s}$  é dada em (2.27).

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.27)$$

Onde,

$\vec{r}$  - Vector posição

$n$  - Índice refractivo

$\vec{s}$  - Vector direcção

$\sigma_s$  - Coeficiente de dispersão

$\vec{s}'$  - Dispersão do vector direcção

$\sigma$  - Constante de Stefan- Boltzmann

$s$  - Comprimento da partícula

$(5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4)$

$a$  - Coeficiente de absorção

$T$  - Temperatura

$I$  - intensidade de radiação que  
depende do vector posição  $\vec{r}$  e do  
vector direcção  $\vec{s}$  na direcção  $\Omega$ .

$\Phi$  - Função Fase  
 $\Omega'$  - Ângulo Sólido

O primeiro termo em (2.27) representa a variação da intensidade de radiação num feixe ao atravessar o meio representado pelo termo  $(a + \sigma_s)$ , correspondendo à espessura óptica ou opacidade do meio, que é igual ao balanço entre a energia emitida e absorvida e o balanço de energia associado à dispersão entre todas as direcções e a direcção considerada. O índice refractivo  $n$  revela a sua importância quando considerada a radiação num meio semitransparente. A Figura 2.2 representa o processo de transferência de calor por radiação.

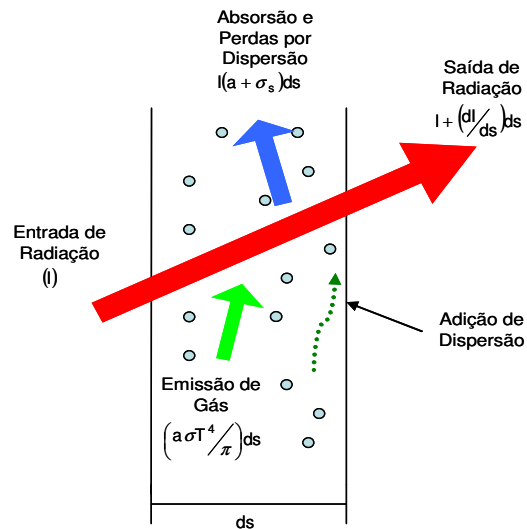


Figura 2.2: Processo de transferência de calor por radiação.

### *Método de radiação ordenadas discretas (DO)*

O modelo de radiação de ordenadas discretas (DO Discrete Ordinates) resolve as equações de transferência radiativa para um número finito de ângulos sólidos discretos, cada um deles, associado com o vector direcção  $\vec{s}$ , fixado no sistema global cartesiano  $(x, y, z)$ . A refinação da discretização angular é definida por parâmetros que dependem do tipo de problema que se pretende resolver. O modelo de radiação (DO) transforma a equação (2.27) numa equação de transporte para uma intensidade de radiação no eixo de coordenadas espaciais  $(x, y, z)$ . O modelo (DO) resolve tantas equações de transporte quantas as direcções  $\vec{s}$ , revelando-se este método de solução idêntico ao utilizados nas equações de energia.



A implementação desta solução no FLUENT® utiliza uma variação conservativa do modelo de ordenadas discretas denominada pelo método de volumes finitos [54] [55] e uma extensão de malhas não estruturadas [56].

O modelo DO considera a equação de transferência radiativa em (2.27) na direcção  $\vec{s}$ , assim como um campo de equações, podendo ser reescrita na equação (2.28).

$$\nabla \cdot (\vec{I}(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.28)$$

#### Discretização angular e pixelização

Cada octante do espaço angular  $4\pi$  em qualquer posição espacial é discretizada em  $N_\theta \times N_\phi$  ângulos sólidos com extensão contínua  $\omega_i$ , denominando-se por ângulos de controlo.

Os ângulos  $\theta$  e  $\phi$  são respectivamente os ângulos polar e azimutal, sendo medidos no sistema referencial cartesiano  $(x, y, z)$ , conforme a Figura 2.3. As extensões dos ângulos de controlo  $\theta$  e  $\phi$ , respectivamente  $\Delta\theta$  e  $\Delta\phi$ , são constantes.

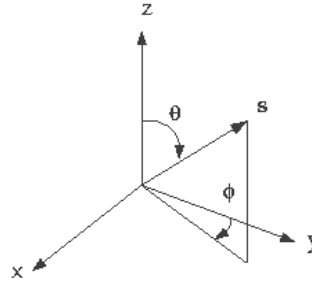


Figura 2.3: Representação dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$  no referencial cartesiano.

Quando da utilização de malhas em referenciais cartesianos, é possível alinhar a discretização angular global com a face do volume de controlo, conforme a Figura 2.4.

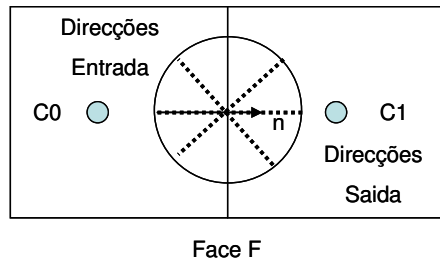


Figura 2.4: Alinhamento da discretização angular com a face do volume de controlo.

O modelo geométrico em estudo adoptou uma malha não estruturada, pelo que as faces dos volumes de controlo não alinham com a discretização angular global, condicionando para o problema de controlo de ângulo conforme a Figura 2.5.

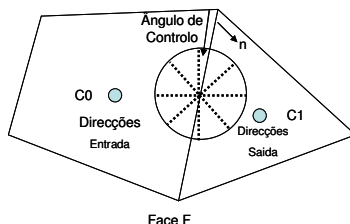


Figura 2.5: Discretização angular com a face do volume de controlo sem alinhamento angular.

Essencialmente, os ângulos de controlo podem confinar as faces dos volumes de controlo para que parcialmente entrem e saiam da face. A Figura 2.6 exemplifica numa representação 3D, a face com um ângulo de controlo.

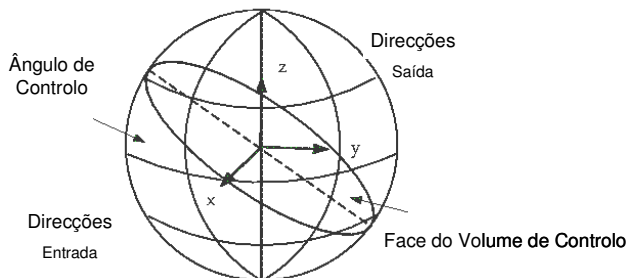


Figura 2.6: Face do volume de controlo com ângulo de controlo.

A face do volume de controlo corta a esfera, representando o espaço angular num ângulo arbitrio com a linha de intersecção representada por uma circunferência inscrita. O ângulo de controlo pode resultar de uma reflexão ou refacção do meio, pelo que nesses casos deverá efectuar-se uma correcção da fracção divergente. A correcção deverá ser efectuada através da recorrência ao método de pixelização [56].

O método da pixelização divide cada ângulo de controlo em  $N_{\phi} \times N_{\phi}$  pixeis ou células, tal como a Figura 2.7. A energia contida em cada célula é tratada à medida que entra e sai da célula. Em problemas onde prevaleça radiação difusa cinzenta, a malha por defeito tem uma pixelização de  $1 \times 1$ , no entanto para problemas que envolvam condições de fronteira simétricas, uma pixelização mais refinada de  $3 \times 3$  é suficiente.

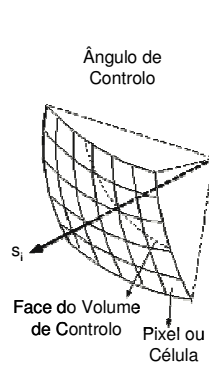


Figura 2.7: Pixelização do ângulo de controlo.

#### *Tratamento das condições de fronteira de paredes em difusão cinzenta*

Para uma radiação cinzenta, o fluxo de radiação incidente  $q_{in}$  nas paredes é dado em (2.29), e o fluxo radiativo que sai da parede é dado em (2.30) com  $n$  a representar o índice refractivo do meio de propagação perto da parede e  $\varepsilon_\omega$  a emissividade da parede.

$$q_{in} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{in} \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad (2.29)$$

$$q_{out} = (1 - \varepsilon_\omega) q_{in} + n^2 \varepsilon_\omega \sigma T_\omega^4 \quad (2.30)$$

A intensidade limite para todas as direcções de saída  $\vec{s}$  na parede é dado em (2.31).

$$I_0 = q_{out} / \pi \quad (2.31)$$

#### *Tratamento das condições de fronteira de superfícies simétricas e escoamentos*

Em superfícies simétricas, a direcção dos raios  $\vec{s}_r$  reflectidos, corresponde à direcção de entrada  $\vec{s}$ , sendo dado por (2.32) e (2.33).

$$\vec{s}_r = \vec{s} - 2(\vec{s} \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (2.32)$$

$$I_\omega(\vec{s}_r) = I_\omega(\vec{s}) \quad (2.33)$$

O tratamento das condições de fronteira nas entradas e saídas de escoamentos é calculado de forma semelhante às paredes, adquirindo contudo características de um corpo negro, apresentando um valor de emissividade 1.0.

### 2.1.6 Esquema numérico

O motor de cálculo FLUENT<sup>®</sup> resolve as equações integrais de continuidade, momento e outros escalares como a energia, turbulência, radiação, etc. O método de cálculo é baseado no volume de controlo, que consiste:

- Numa divisão do domínio de cálculo através da discretização de volumes de controlo (utilizando para o efeito malhas computacionais);
- Numa integração das equações de estado em volumes de controlo individuais de forma a construir as equações algébricas para as variáveis dependentes discretizadas, como velocidade, pressão, temperatura e escalares;
- Numa linearização das equações discretizadas e solução dos sistemas de equações lineares resultantes para actualização dos valores das variáveis dependentes.

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não lineares. Em casos como escoamento numa só dimensão, as equações podem contudo ser simplificadas em equações lineares. A não linearidade torna a maioria dos problemas de difícil resolução, sendo o principal contribuinte para a turbulência nas equações do modelo. A não linearidade deve-se à aceleração convectiva, associado ao fenómeno de mudança da velocidade na posição como por exemplo a passagem de um fluido viscoso por um *venturi*.

As equações de estado são resolvidas sequencialmente e separadamente (Método “Segregated”). Derivado das equações de estado serem não-lineares, são necessárias várias iterações para a solução convergir na solução pretendida. Cada iteração consiste na execução dos seguintes passos ilustrados na Figura 2.8 e abaixo descritos:

1. As propriedades do fluido são actualizadas, baseadas na solução actual;
2. Cada uma das equações de momento  $u$ ,  $v$  e  $w$  são resolvidas, sendo os valores obtidos, utilizados para a determinação da pressão e fluxos de massa, no sentido de actualizar o campo de velocidades;
3. Caso as velocidades obtidas no passo anterior não satisfaçam a equação de continuidade, uma equação de “Poisson-type” para correcção da pressão é derivada da equação da continuidade da linearização das equações do momento. A equação da correcção de pressão é resolvida de forma a obter as correcções necessárias nos campos de pressão, velocidade e fluxos de massa, de forma que a continuidade seja garantida;

4. As equações para os escalares (turbulência, energia e radiação) são resolvidas com utilização prévia dos valores actualizados das variáveis anteriores;
5. Verificação da convergência;
6. Os passos são repetidos em iterações até que o critério de convergência seja satisfeito.

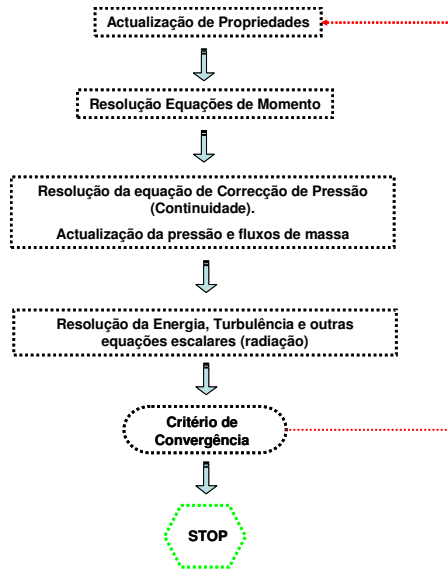


Figura 2.8: Método de resolução de equações de estado.

### Linearização

As equações de estado não lineares discretizadas, são linearizadas de forma a produzir um sistema de equações para as variáveis dependentes em cada célula ou pixel da malha de controlo. O sistema linear resultante é posteriormente resolvido e actualizado na solução do campo de escoamento.

A linearização das equações de estado é efectuada através do Método Implícito, onde para uma dada variável, o valor desconhecido de cada célula é calculado, com recurso a uma relação que inclui valores conhecidos e desconhecidos das células vizinhas. Todas as variáveis calculadas num determinado ponto  $i$  e instante  $j+1$ , são calculadas em função apenas dos valores conhecidos nesse ponto e instante. Consequentemente, cada variável a calcular, aparece em mais de que uma equação no sistema, devendo as mesmas ser resolvidas simultaneamente para dar as quantidades desconhecidas. Desta forma obtém-se um sistema linear de equações com uma equação para cada célula no domínio de cálculo. Como apenas existe uma equação por célula, pode ser denominado por sistema escalar de equações. A resolução da equação linear num ponto implícito (Gauss-Seidel) é utilizado conjuntamente com um método Multi-Malha Algébrica (AMG – Algebraic multigrid) para resolução do sistema escalar de equações para as variáveis dependentes em cada célula. A título exemplificativo, a equação

do momento  $x$  é linearizada para produzir um sistema de equações em que a velocidade  $u$  é desconhecida. A solução simultânea do sistema de equações (utilizando o método de resolução escalar AMG) actualiza o campo de velocidades  $u$ . Sumariamente, o FLUENT<sup>®</sup> procede à resolução de cada uma das variáveis ( $ex, p$ ) considerando todas as células ao mesmo tempo. Posteriormente resolve para o seguinte campo de variáveis, considerando igualmente todas as células ao mesmo tempo.

A grande vantagem de um método completamente implícito é revelada na sua estabilidade incondicional no incremento do intervalo temporal.

### *Discretização espacial*

A obtenção de soluções numéricas numa região contínua, definida por inúmeros pontos ao qual designamos por domínio de cálculo, apenas é possível através da discretização do domínio, constituindo uma malha de controlo, onde em cada volume de controlo que compõe a malha são obtidas as soluções.

O FLUENT<sup>®</sup> utiliza o método baseado no método de volumes finitos para transformar as equações de estado em equações algébricas, para poderem ser resolvidas numericamente. O método consiste na integração das equações de estado em cada volume de controlo, obtendo-se equações discretizadas que conservam cada quantidade numa base de volume de controlo.

Embora o estudo da presente tese seja efectuado em regime transiente, a discretização das equações de estado é mais facilmente explicado, considerando a equação de conservação para o transporte de uma quantidade escalar  $\phi$  em regime estacionário. A sua demonstração é efectuada em (2.34), escrita na sua forma integral para um volume de controlo arbitrário  $V$  com  $\vec{A}$  a representar o vector área superfície.

$$\oint \rho \phi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (2.34)$$

A equação (2.34) é aplicada a cada volume de controlo, ou célula no domínio de cálculo. A célula triangular 3D apresentada na Figura 2.9 representa o volume de controlo com a discretização da equação em (2.34) na respectiva célula dada por (2.35). Algumas designações encontram-se na lista de símbolos, no entanto apresenta-se  $\rho \vec{V}_f \cdot \vec{A}_f$  como o fluxo mássico que atravessa a face da célula.

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho \vec{V}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (2.35)$$

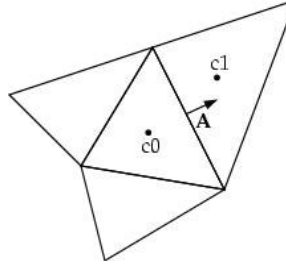


Figura 2.9: Discretização de uma equação escalar de transporte num volume de controlo.

As equações resolvidas tomam a mesma forma geral que a dada anteriormente e são aplicadas a malhas não estruturadas poli ou hexaédricas.

No centro das células de controlo são armazenados os valores discretizados do escalar  $\phi$  ( $C_0$  e  $C_1$  na Figura 2.9), contudo os valores da face  $\phi_f$  são requeridos para os termos convectivos da equação (2.35) e devem ser interpolados a partir do centro da célula. Este processo deve ser acompanhado por um esquema “Upwind”. O esquema “Upwind” significa que o valor da face  $\phi_f$  é derivado das quantidades a montante da célula relativamente à direcção normal da velocidade  $v_n$  da equação (2.35).

### ***Técnicas de discretização***

As técnicas de discretização das equações passíveis de serem aplicadas serão “Upwind” de 1ª Ordem e “Upwind” de 2ª Ordem, no entanto aos termos do modelo em estudo aplicaram-se de 1ª ordem.

#### ***Upwind de 1ª Ordem***

Quando se pretende a precisão de 1ª ordem, as quantidades das faces das células são determinadas assumindo que os valores do centro da célula em qualquer campo de variáveis representam um valor médio e constante por toda a célula. As quantidades da face são idênticas às quantidades da célula. Desta forma quando se trata de um esquema de 1ª ordem, o valor  $\phi_f$  da face é igual ao valor  $\phi_f$  do centro da célula.

#### ***Forma linearizada da equação discreta***

A equação escalar de transporte discretizada em (2.35) contém a desconhecida variável escalar  $\phi$  no centro da célula, assim como os valores desconhecidos na proximidade das células vizinhas. A equação referida anteriormente é não linearizada no que respeita às variáveis. A forma linearizada é reescrita em (2.36).

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.36)$$

Onde a subscrição nb refere-se às células vizinhas, e  $a_p$  e  $a_{nb}$  são os coeficientes linearizados para  $\phi$  e  $\phi_{nb}$ .

Equações similares a (2.36) podem ser escritas para cada célula que compõem a malha, resultando numa série de equações algébricas. Para as equações escalares, é resolvido o sistema linear utilizando o método implícito (Gauss-Seidel) em conjugação com o método algébrico multi-malha (AMG).

#### *Factor de relaxação*

Derivado da não linearidade da série de equações a serem resolvidas, é necessário controlar a variação de  $\phi$  através de um factor de relaxação, que reduz a variação de  $\phi$  produzida durante cada iteração. De uma forma simplificada, o novo valor da variável  $\phi$  da célula depende, do valor antigo  $\phi_{antigo}$ , do valor calculado de  $\phi$ ,  $\Delta\phi$  e do factor de relaxação  $\alpha$ , conforme descrito em (2.37). Os valores de relaxação mais reduzidos produzem resultados favoráveis, facilitando a convergência da solução.

$$\phi = \phi_{antigo} + \alpha \Delta\phi \quad (2.37)$$

#### ***Discretização das equações do momento e continuidade***

A discretização das equações do momento e continuidade, e as suas soluções são descritas considerando as equações da continuidade e momento em regime estacionário na sua forma integral em (2.38) e (2.39) com  $I_D$  a representar a matriz identidade,  $\bar{\tau}$  o tensor de tensões viscosas e  $\vec{F}$  o vector força:

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.38)$$

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\oint p I_D \cdot d\vec{A} + \oint \bar{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (2.39)$$



### Discretização da equação do momento

A discretização utilizada para uma equação escalar de transporte pode ser utilizada para discretizar as equações do momento. Para o momento  $x$  a equação pode ser obtida através da consideração de  $\phi = u$  em (2.40).

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p f A \cdot \hat{i} + S \quad (2.40)$$

Caso o campo de pressões e fluxos de massa fosse conhecido, (2.40) podia ser resolvida para que o campo de velocidades fosse obtido, contudo o campo de pressões e fluxos de massa não é conhecido e deve ser obtido como uma parte da solução. Existem aspectos relevantes no armazenamento de dados de pressão e discretização do termo do gradiente de pressão que serão abordados nesta secção. Ambos os valores da pressão e velocidade obtidos são armazenados no centro das células, contudo a equação (2.40) necessita do valor de pressão na face entre as células  $c0$  e  $c1$  da Figura 2.9. Desta forma é necessário efectuar uma interpolação de forma a calcular os valores de pressão da face a partir dos valores das células.

A forma de interpolação prevista por definição interpola os valores de pressão das faces das células, utilizando os coeficientes da equação do momento. Este procedimento funciona enquanto a variação de pressão entre o centro das células for regular. Quando ocorrem ressaltos ou grandes gradientes nos termos fonte do momento entre os volumes de controlo o perfil de pressão apresenta igualmente um forte gradiente na face da célula, e não pode ser interpolado através deste esquema, resultando numa discrepância de velocidade da célula.

Situações em que o esquema padrão de interpolação de pressão apresenta alguns problemas, tal como escoamentos com grandes forças gravitacionais ou escoamentos de enorme rotação, é necessário refinar a malha em regiões de elevados gradientes de forma a resolver as variações de pressão correctamente. O FLUENT® assume um gradiente de pressão normal na parede com valor zero. Sendo válido para camadas limites, na presença de forças gravitacionais não o é, resultando numa falha de correcção do gradiente de pressão na parede e manifestado por vectores velocidade apontando para o interior e para o exterior das paredes. Desta forma, no sentido de minimização do erro induzido, prevê-se a adopção de um esquema “body-forced weighted” para o cálculo da pressão da face da célula, assumindo que a aceleração normal do fluido resultante do gradiente de pressão e das forças gravitacionais é contínuo através de cada face. Os valores resultantes são positivos se as forças gravitacionais forem conhecidas anteriormente para introdução nas equações de momento.

### *Discretização da equação da continuidade*

A equação (2.38) pode ser integrada pelo volume de controlo da Figura 2.9 de forma a obter (2.41) discretizada, adquirindo  $J_f$  a designação de fluxo de massa através da face  $f$ ,  $\rho v_n$ .

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (2.41)$$

As equações do momento e continuidade são resolvidas sequencialmente através do método “segregated”, pelo que neste procedimento sequencial, a equação da continuidade é utilizada como uma equação para a pressão.

Contudo a pressão não aparece explícita em (2.41) para escoamentos incompressíveis, dado que a densidade não se encontra directamente relacionada com a pressão. O algoritmo SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) é utilizado para introduzir a pressão na equação da continuidade. Desta forma é necessário relacionar os valores de velocidade  $v_n$  da face com os valores de velocidade no centro das células. O valor da velocidade  $v_n$  da face não é calculado por média aritmética, mas sim por peso ponderado do momento, utilizando para isso os factores ponderados baseados no coeficiente  $a_p$  da equação (2.41). O caudal mássico na face da célula  $J_f$  pode ser escrito em (2.42).

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (2.42)$$

Onde  $p_{c0}$  e  $p_{c1}$  são os valores de pressão das duas células em cada lado da face e  $\hat{J}_f$  contém a influência das velocidades nessas células. O termo  $d_f$  é função de  $\bar{a}_p$ , designado como a média dos coeficientes  $a_p$  da equação do momento para as células em cada uma das faces  $f$ .

### ***Pressão Velocidade acoplado com o SIMPLE***

O acoplamento da pressão-velocidade é obtido através da utilização da equação (2.42), derivando na equação para a pressão através da equação da continuidade discretizada em (2.41). O método SIMPLE utiliza uma relação entre as correcções da velocidade e pressão de forma a forçar a conservação de massa e obter o campo de pressão.

Se a equação de momento é resolvida com um suposto campo de pressão  $p^*$ , o resultado do fluxo  $J_f^*$  através da face dado pela equação (2.43) não satisfaz a equação da continuidade. Consequentemente é adicionado à face do caudal mássico  $J_f^*$ , a correcção  $J_f'$ , resultando no caudal mássico corrigido dado por  $J_f$  em (2.44), satisfazendo a equação da continuidade. O algoritmo SIMPLE postula que o termo  $J_f'$  seja escrito em (2.45) com  $p'_{c0}$  a assumir o valor de correcção da pressão da célula.

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f (p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (2.43)$$

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (2.44)$$

$$J_f' = d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (2.45)$$

O algoritmo SIMPLE substitui as equações de correcção de fluxos (2.44) e (2.45) numa equação de continuidade discretizada (2.41), de forma a obter uma equação discreta para a correcção de pressão  $p'$  na célula conforme (2.46), com o termo  $b$  a assumir o caudal mássico da célula dado por (2.47).

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (2.46)$$

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (2.47)$$

A equação da correcção de pressão (2.46) pode ser resolvida utilizando o método AMG. Uma vez a solução obtida, a pressão da célula e o caudal mássico da face são corrigidos utilizando as equações (2.48) e (2.49) com  $\alpha_p$  a assumir o factor de relaxação para a pressão. O caudal mássico corrigido  $J_f$  satisfaz a equação da continuidade discretizada de forma idêntica em cada iteração.

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (2.48)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (\dot{p}_{c0} - \dot{p}_{c1}) \quad (2.49)$$

### *Discretização temporal*

As equações com dependência do tempo têm de ser discretizadas tanto no espaço como no tempo. A discretização temporal envolve a integração de cada termo em equações diferenciais por um intervalo de tempo  $\Delta t$ . A integração dos termos transientes é dada em (2.50) para uma evolução temporal da variável  $\phi$ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (2.50)$$

Onde a função  $F$  incorpora qualquer discretização espacial. Se a derivada do tempo é discretizada através das diferenças finitas (Diferenças para trás), a discretização de 1ª ordem é dada por (2.51) com  $n$  correspondendo ao valor no presente nível temporal  $t$  e  $n+1$  o valor no próximo nível temporal  $t + \Delta t$ .

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (2.51)$$

O método implícito permite determinar  $F(\phi)$  num próximo nível temporal em (2.52), uma vez que  $\phi^{n+1}$  na célula está relacionado com  $\phi^{n+1}$  nas células vizinhas através de  $F(\phi^{n+1})$  conforme (2.53).

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (2.52)$$

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (2.53)$$

Esta equação implícita pode ser resolvida iterativamente com inicialização em  $\phi^i$  até  $\phi^n$  e iterando (2.53) até  $\phi^i$  convergir. Nesse ponto o valor de  $\phi^i$  toma o valor de  $\phi^{n+1}$ .

$$\phi^i = \phi^n + \Delta t F(\phi^i) \quad (2.54)$$

### *Método multi-malha*

A utilização de um método multi-malha, permite acelerar a convergência da solução através do cálculo das correcções numa série de níveis de refinação de malhas. A recorrência a este método permite reduzir drasticamente o número de iterações e o tempo requerido de computação para obter a solução convergida, particularmente quando o modelo contém um número relativamente elevado de volumes de controlo.

O método de resolução da equação linear num ponto implícito (Gauss-Seidel), embora remova rapidamente os erros locais (alta frequência) na solução, os erros globais (de baixa frequência) são reduzidos numa razão inversamente proporcional à dimensão da malha. Assim, para um elevado número nós, a taxa de redução residual torna-se proibitivamente baixa.

As técnicas multi-malhas permitem que os erros globais sejam identificados através da utilização de uma sequência de sucessivas refinações de malhas. Este método baseado no princípio que o erro global (baixa frequência) que existe numa malha refinada, pode ser representado numa malha menos refinada, onde se torna igualmente acessível como um erro local (alta frequência). Desta forma, devido à existência de poucas células de controlo, as correcções globais podem ser rapidamente comunicadas entre as células adjacentes.

Considerando as equações lineares discretizadas dado por (2.55), onde  $\phi_e$  é a solução exacta, a convergência da solução é afectada por um termo defeito associado  $d$ , resultando na solução aproximada  $\phi$  (2.56).

$$A\phi_e + b = 0 \quad (2.55)$$

$$A\phi + b = d \quad (2.56)$$

A correcção  $\psi$  e  $\phi$  para que a solução exacta resulte, é dada em (2.57).

$$\phi_e = \phi + \psi \quad (2.57)$$

Substituindo (2.57) na (2.55), obtém-se as novas equações (2.58) e (2.59) por manipulação algébrica.

$$A(\phi + \psi) + b = 0 \quad (2.58)$$

$$A\psi + (A\phi + b) = 0 \quad (2.59)$$

A utilização da (2.56) e (2.59) resulta na (2.60), correspondendo à equação para a correcção em termos do nível original de refinação do operador  $A$  e do defeito  $d$ . Assumindo que os erros locais (alta frequência) foram suficientemente eliminados pelo método de relaxação num nível refinado, a correcção  $\psi$  será suave e eficazmente resolvida no próximo nível de refinação.

$$A\psi + d = 0 \quad (2.60)$$

A resolução das correcções num nível de refinação requer a transferência do termo defeito  $d$  a partir do nível mais refinado (limitação), computação das correcções e posteriormente transferência das correcções a partir de um nível menos refinado (prolongamento). A equação para os níveis de correcção de refinação  $\psi^H$  é dada em (2.61), sendo  $A^H$  o operador do nível de refinação e  $R$  o operador de restrição responsável pela transferência do defeito  $d$  do nível refinado para o nível menos refinado. A solução de (2.61) é seguida por uma actualização do nível de refinação da solução, dado em (2.62) com  $P$  a representar o operador de prolongamento utilizado para transferir as correcções do nível menos refinado para o nível mais refinado.

$$A^H\psi^H + Rd = 0 \quad (2.61)$$

$$\phi^{\text{novo}} = \phi + P\psi^H \quad (2.62)$$

O ciclo multi-malha pode ser definido como um procedimento recursivo aplicado a cada nível de malha à medida que se analisa a hierarquia da malha. Existem três tipos de ciclo, designando-se por ciclo  $V$  e  $W$  na Figura 2.10 e Flex (Flexível) na Figura 2.11.

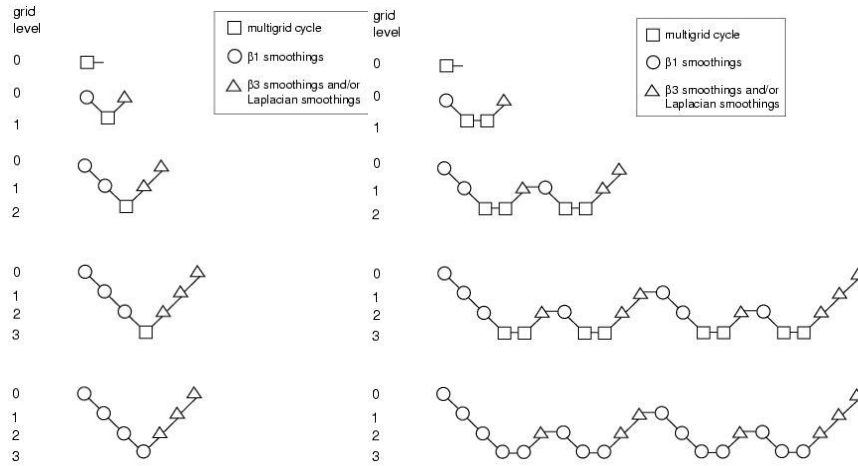


Figura 2.10: Ciclo V e W da multi-malha.

O ciclo da multi-malha da Figura 2.10 é representado por um quadrado e posteriormente expandido de forma a mostrar cada passo efectuado no ciclo. A hierarquia da malha é definida por três parâmetros:

O parâmetro  $\beta_1$  representado por um círculo, marca o início do ciclo da multi-malha (Varrimento de pré-relaxação), sendo aplicado a cada nível da malha de forma a reduzir os componentes de alta frequência do erro (erros locais). Os componentes do erro devem ser reduzidos até que o erro remanescente seja expresso na próxima malha menos refinada sem variações muito acentuadas. Caso seja o nível de malha menos refinada, o ciclo multi-malha neste nível encontra-se completo. Na Figura 2.10 encontram-se definidos três níveis de refinação de malha, em que o quadrado representa o ciclo multi-malha no nível 3, equivalente a um círculo. No início o  $\beta_1$  (pré-relaxação) não é executado, sendo posteriormente o problema restrito a um nível de malha menos refinada através de um operador restrição.

O erro na malha é reduzido através da execução  $\beta_2$  (representados por quadrados na Figura 2.10). A correcção cumulativa calculada na malha é interpolada e devolvida para a malha mais refinada utilizando o operador de prolongamento, representada pelo ângulo ascendente na Figura 2.10. Desta forma o erro de alta frequência encontra-se presente num nível de malha mais refinada devido ao procedimento de prolongamento utilizado na transferência da correcção.

No passo final o parâmetro  $\beta_3$  (pós relaxação) é executado de forma a reduzir o erro de alta frequência introduzido na malha pelo parâmetro  $\beta_2$ , representado na Figura 2.10 por triângulos.

Para o ciclo flexível “Flex”, o cálculo e a utilização das correcções da refinação da malha é controlado num procedimento multi-malha através da lógica demonstrada na Figura 2.11. Esta lógica garante que os cálculos efectuados na malha são invocados quando a taxa de redução

residual na malha é demasiado baixa. Os controlos da multi-malha ditam quando a solução iterativa da correcção em cada nível de refinação da malha converge, sendo aplicado na solução da próxima malha mais refinada. Estas duas decisões são controladas pelos parâmetros de correcção  $\alpha$  e  $\beta$  da Figura 2.11.

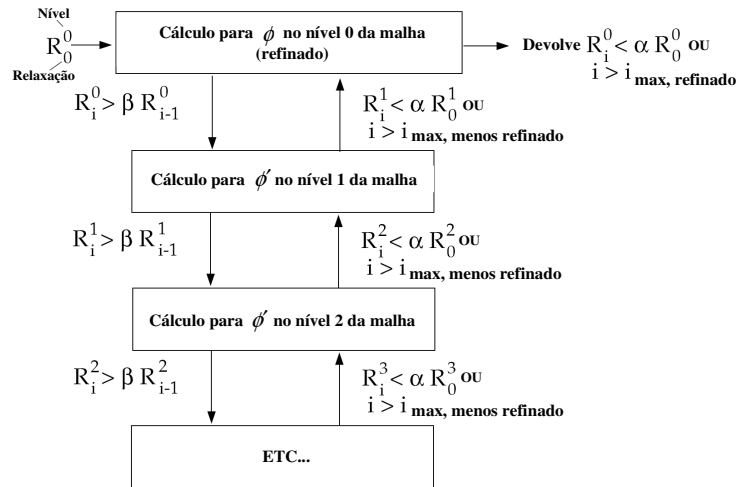


Figura 2.11: Lógica de controlo do ciclo “Flex”.

A lógica do procedimento multi-malha compreende que os diversos níveis da malha sejam visitados repetidamente durante uma simples e global iteração na equação. Numa análise com 4 níveis de multi-malha (0,1,2 e 3), o procedimento ciclo “flex” para resolução de uma dada equação de transporte pode visitar os diversos níveis de malha com a seguinte sequência 0-1-2-3-2-3-2-1-0-1-2-1-0.

A grande diferença entre o ciclo “Flex” e o ciclo “V” e “W”, tem que ver com a satisfação da tolerância da redução residual e o critério de terminação da iteração que determinam quando e com que frequência cada nível da malha é visitado, enquanto no ciclo “V” e “W” o padrão transversal é explicitamente definido.

Relativamente ao critério de redução residual, o procedimento multi-malha invoca cálculos no próximo nível de malha menos refinado quando a taxa de redução do erro no presente nível de malha é insuficiente conforme dado em (2.63).  $R_i$  assume por definição a soma absoluta dos valores residuais calculados no presente nível de malha após  $i$  relaxações neste nível.

$$R_i > \beta R_{i-1} \quad (2.63)$$



Através da equação (2.63) verifica-se que, caso o valor residual presente na solução iterativa após  $i$  relaxações for maior que alguma fracção,  $\beta$  (compreendido entre 0 e 1), do valor residual actual após a  $(i-1)$  relaxações, a próxima malha menos refinada deverá ser visitada. O valor  $\beta$  representa a tolerância de redução residual e determina quando se abandona a solução iterativa no nível de malha actual e se passa a resolver as equações de correcção na próxima malha menos refinada. O valor de  $\beta$  controla a frequência com que os níveis de refinação de malhas são visitadas. O valor por defeito é 0.1. Um valor mais elevado resulta em visitas menos frequentes, e um valor mais reduzido resulta em visitas mais frequentes.

Dado que a taxa de redução residual é suficientemente rápida, as equações de correcção irão convergir no mesmo nível de malha e o resultado será aplicado ao campo de soluções no próximo nível de malha mais refinado. As equações de correcção no presente nível de malha são consideradas suficientemente convergentes quando o erro na solução de correcção é reduzido a uma fracção  $\alpha$  (entre 0 e 1) do erro original no mesmo nível de malha, conforme (2.64).

$$R_i < \alpha R_0 \quad (2.64)$$

$R_i$  assume o valor residual no mesmo nível de malha após  $i$  iterações neste nível e  $R_0$  é o valor residual que foi inicialmente obtido neste nível de malha na iteração global. O parâmetro  $\alpha$  definido com o critério de terminação, apresenta um valor por defeito de 0.1. A equação referida anteriormente é utilizada igualmente para terminar os cálculos no nível de malha mais refinado (mais baixo) durante o procedimento multi-malha. As relaxações continuam em cada nível de malha (incluindo o nível de malha mais refinado) até que o critério desta equação seja obedecido (ou até um número máximo de relaxações esteja completo).

O algoritmo multi-malha retrata o comportamento de um esquema AMG (Algebraic Multi-Grid), pois as equações dos níveis de refinação são geradas sem a utilização de qualquer geometria ou re-discretização dos níveis de refinação, tornando-se num algoritmo extremamente interessante para malhas não estruturadas, como é o caso deste estudo. A vantagem é que não é necessária a criação ou armazenamento de malhas nem desenvolvimento de cálculo de fluxos ou termos fonte nas células das malhas. Neste tipo de algoritmo, uma vez o sistema linearizado, as não linearidades não são resolvidas até que o operador do mesmo nível seja actualizado.

Os operadores de limitação e prolongamento são utilizados num esquema AMG numa base de correcção adicional. A transferência inter-nivelares de malha são acompanhadas por interpolações e prolongamentos. O defeito em cada célula de cada nível de refinação de malha é dado pela soma de todos os defeitos a partir das células dos níveis mais refinados, enquanto

as correcções do nível das malhas mais refinadas são obtidas por injeção dos valores das malhas menos refinadas. Desta forma o operador de prolongamento é dado pela transposta do operador de limitação, dado em (2.65).

$$P = R^T \quad (2.65)$$

O operador de limitação é definido por um agrupamento de células de um nível de malha refinado em células de uma malha menos refinada. Neste processo cada célula da malha refinada é agrupada com uma ou várias das células vizinhas mais fortes, com preferência às células vizinhas não agrupadas. O algoritmo pretende colectar células em grupos de dimensão fixa, 2, 4 ou outro número específico. No contexto do grupo, o mais forte refere-se à célula vizinha  $j$  da presente célula  $i$  para que o coeficiente  $A_{ij}$  seja maior. Nas equações,  $A_{ij}$  é um bloco matriz e a medida do seu valor é simplesmente obtida para ser o valor do primeiro elemento. Além disso as equações para uma determinada célula são tratadas em conjunto e não divididas entre as diferentes células.

### *Soluções residuais*

Durante o processo de cálculo, é possível a monitorização da convergência dinâmica através de uma análise aos valores residuais. No final de cada iteração, a soma residual para cada uma das variáveis conservadas é calculada e armazenada, permanecendo um histórico de convergências.

Após discretização, a equação de conservação para uma variável geral  $\phi$  na célula  $P$  pode ser escrita em (2.66).

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.66)$$

Onde  $a_P$  é o coeficiente central,  $a_{nb}$  são os coeficientes de influência para as células vizinhas e  $b$  é a contribuição da parte constante do termo fonte  $S_C$  em  $S = S_C + S_P \phi$  e das condições fronteira, conforme (2.67).

$$a_P = \sum_{nb} a_{nb} - S_P \quad (2.67)$$

O valor residual  $R^\phi$  calculado resulta do desequilíbrio da (2.66) somado sobre todas as células P calculadas. Isto é referido com um valor residual sem escala, podendo ser escrito em (2.68).

$$R^\phi = \sum_{\text{células P}} \left| \sum_{\text{nb}} a_{\text{nb}} \phi_{\text{nb}} + b - a_P \phi_P \right| \quad (2.68)$$

Na generalidade é difícil decidir a convergência mediante a análise dos valores residuais através de (2.68) dado que não é empregue nenhum factor de escala. O FLUENT® utiliza uma escala para os valores residuais, utilizando um factor de escala representativo do caudal volúmico de  $\phi$  através do domínio de cálculo. O valor residual escalado é dado em (2.69).

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{células P}} \left| \sum_{\text{nb}} a_{\text{nb}} \phi_{\text{nb}} + b - a_P \phi_P \right|}{\sum_{\text{células P}} |a_P \phi_P|} \quad (2.69)$$

Para as equações do momento, o termo  $a_P \phi_P$  no denominador é substituído por  $a_P v_P$ , onde  $v_P$  é o valor da velocidade na célula P. O valor residual escalado é o indicador de convergência mais apropriado. Para a equação da continuidade, o valor residual não escalado é definido em (2.70).

$$R^C = \sum_{\text{células P}} |\text{Taxa de massa criada na célula P}| \quad (2.70)$$

O valor residual escalado para a equação da continuidade é definido em (2.71). O denominador é o maior valor residual absoluto da continuidade nas primeiras 5 iterações.

$$\frac{R^C_{\text{iteração N}}}{R^C_{\text{iteração 5}}} \quad (2.71)$$

## 2.2 Modelação da qualidade do ar interior e conforto

### Térmico

As fontes interiores de poluição que geram gases ou partículas para o ar são a causa primária dos problemas de qualidade de ar. Uma ventilação incapaz de introduzir a quantidade de ar necessário para diluir as emissões de poluentes interiores ou mesmo promover a extracção, desencadeia o aumento dos níveis de concentração de poluentes. Aliado a uma ineficaz ventilação, o aumento da temperatura e humidade específica derivado da presença de seres humanos promove o aumento dos níveis de geração de poluentes, agravando igualmente os níveis de qualidade de ar interior e comprometendo o conforto térmico ocupacional.

Nos próximos sub capítulos aborda-se em detalhe a temática da qualidade de ar interior, das condições de conforto térmico e eficácia de ventilação.

#### *2.2.1 Análise de conforto térmico*

O ser humano caracteriza-se por ser um animal homeotérmico, derivado da necessidade de manter a sua temperatura relativamente constante nos 37 °C, obrigando a uma incessante procura do equilíbrio térmico com o meio envolvente à custa de uma taxa metabólica.

A percepção psicológica do equilíbrio térmico é definida como um estado de espírito que expressa a satisfação da pessoa com o ambiente envolvente (nem quente nem frio) [57]. Desta forma a sensação adquire uma subjectividade com forte dependência de aspectos biológicos, físicos e emocionais, tornando-se numa missão complexa satisfazer o conforto térmico de todas as pessoas que ocupam o mesmo espaço, apenas com uma condição térmica.

Um ambiente neutro ou confortável é um ambiente que permite que a produção de calor no processo metabólico do ocupante se equilibre com as trocas de calor (perdas ou ganhos) do ambiente. Em situações onde exista adversidade nas trocas energéticas, pode ocorrer risco de saúde, dado os mecanismos de termorregulação do organismo não conseguirem manter a temperatura interna constante e adequada, originando situações de stress térmico, por calor ou frio.

O calor produzido no corpo é variável em função da idade, sexo e indubitavelmente pelo nível da actividade física do ser humano. Na conservação da lei zero da termodinâmica, o processo de transferência de calor é efectuado por condução, convecção, radiação e evaporação, com a convecção a adquirir dependência de variáveis externas como a temperatura e a velocidade do ar. A radiação depende da temperatura radiante média e a evaporação da humidade específica e da velocidade do ar.

A sensação de conforto térmico encontra-se intrinsecamente influenciada por variáveis individuais e variáveis ambientais. As variáveis individuais englobam o tipo de actividade física,

a indumentária e a aclimatização, e as variáveis ambientais, a temperatura do ar (temperatura de bolbo seco), a humidade relativa, a temperatura média radiante e a velocidade do ar.

Nas variáveis individuais destacam-se o metabolismo correspondendo à taxa de utilização de energia pelo corpo, integrando a componente do metabolismo basal (taxa obtida em repouso) e do nível de actividade física (taxa resultante do esforço físico). A variação do metabolismo que depende invariavelmente da área corporal, correlacionando a altura e o peso, e a relação entre a actividade e o metabolismo é apresentada exaustivamente no Capítulo 3, na secção da Taxa de Produção de CO<sub>2</sub>. A indumentária adoptada em função das condições interiores é caracterizada através de um índice de resistência térmica ( $I_{cl}$  [m<sup>2</sup>K/W]), sendo na ISO 7730:1994 considerada a nomenclatura de clo (proveniente da palavra clothing), correspondendo 1 clo a uma resistência térmica de 0.155 m<sup>2</sup>K/W. No Capítulo 3, secção das Condições do Modelo são apresentados os valores de resistência térmica adoptados para o estudo em causa.

A equação de conforto térmico permite calcular o termo de conservação de energia no corpo, correspondente à diferença entre o metabolismo desenvolvido no corpo e a transferência de calor para o ambiente. O balanço térmico [W/ m<sup>2</sup>] é dado pela equação (2.72), com a representação dos termos da equação na Tabela 2.1. O metabolismo encontra-se representado por  $M$  [W/m<sup>2</sup>],  $W$  [W/m<sup>2</sup>] o trabalho realizado para o exterior,  $p_{vap}$  [Pa] a pressão parcial de vapor de água do ar ambiente,  $T_a$  [°C] a temperatura do ar,  $f_{cl}$  [-] o factor de vestuário,  $T_{cl}$  [°C] a temperatura exterior do vestuário,  $T_{rm}$  [°C] a temperatura radiante média dos elementos opacos do espaço e  $h_c$  [W/m<sup>2</sup>K] o coeficiente de convecção entre a superfície exterior do vestuário e o ar interior.

$$\text{Balanço Térmico } BT = \sum_{i=A}^G x_i \quad (2.72)$$

Tabela 2.1: Caracterização dos termos da equação do balanço térmico

Nomenclatura	Designação	Termo da Equação
$x_A$	Metabolismo	$M - W$
$x_B$	Termo Difusão Vapor	$-3,05 \times 10^{-3} \times (5733 - 6,99 \times (M - W) - p_{vap})$
$x_C$	Termo Respiração	$-(0,42 \times (M - W) - 58,15)$
(Continua na página seguinte)		

Nomenclatura	Designação	Termo da Equação
$x_D$	Termo Respiração Latente	$-1,7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_{vap})$
$x_E$	Termo Respiração Sensível	$-0,0014 \times M \times (34 - T_a)$
$x_F$	Termo de Radiação	$-3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4]$
$x_G$	Termo de Convecção	$-f_{cl} \times h_c \times (T_{cl} - T_a)$

A expressão da temperatura média radiante resulta da média ponderada dos factores de forma das paredes para o ocupante e respectivas temperaturas das superfícies envolventes, sendo dada por (2.73).

$$T_{rm} = \frac{[(0,18 \times (T_{tecto} + T_{chão}) + 0,22 \times (T_{Este} + T_{Oeste}) + 0,3 \times (T_{Norte} + T_{Sul}))]}{[2 \times (0,18 + 0,22 + 0,3)]} \quad (2.73)$$

A temperatura da superfície do vestuário é obtida por balanço energético igualando a transferência por condução da pele para o vestuário à transferência de calor por convecção e radiação, resultando na equação não linear que se apresenta em (2.74).

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \times (M - W) - I_{cl} \times \left[ (3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl}) \times [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4] + \dots \right] \quad (2.74)$$

$$\dots + f_{cl} \times h_c (T_{cl} - T_a) ]$$

O factor de vestuário caracteriza-se pela razão entre a área exterior do vestuário e a área corporal. A relação vestido nu representada por  $f_{cl}$  é dada pela correlação dada na equação (2.75) para diferentes valores de resistência térmica.

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 \times I_{cl} \text{ para } I_{cl} < 0,078 \text{ m}^2\text{K} / \text{W} \quad (2.75)$$

$$f_{cl} = 1,00 + 0,645 \times I_{cl} \text{ para } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$$

O coeficiente de convecção  $h_c$  varia com a velocidade do ar, com a temperatura seca do ar  $T_a$  e a temperatura da superfície do vestuário  $T_{cl}$ , sendo dado pela equação (2.76).

$$\begin{cases} h_c = 2,38 \times (T_{cl} - T_a)^{0,25} \\ \text{Se } 2,38 \times (T_{cl} - T_a)^{0,25} > 12,1 \times \sqrt{v} \\ h_c = 12,1 \times \sqrt{v} \\ \text{Se } 2,38 \times (T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1 \times \sqrt{v} \end{cases} \quad (2.76)$$

A norma ISO 7730:1994 [57] estabelece o critério de conforto térmico de um espaço quando não mais que 10% dos seus ocupantes se sentem desconfortáveis. O valor de insatisfação é mensurável através da determinação da percentagem de pessoas insatisfeitas PPD.

A metodologia de cálculo envolve a determinação do índice de PMV com base no valor do balanço térmico do corpo e do metabolismo através da correlação definida em (2.77). O índice PMV destina-se a identificar numa escala qualitativa, uma sensação de calor ou de frio com os valores respectivamente de +3 (Muito Quente), +2 (Quente), +1 (Ligeiramente quente), 0 (Neutro), -1 (Ligeiramente frio), -2 (Frio) e -3 (Muito Frio).

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036 \times M) + 0,028] \times BT \quad (2.77)$$

A percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) é dada através da correlação (2.78) com forte dependência do índice PMV. A situação que prevê a condição neutra resulta indubitavelmente numa percentagem de 5% de insatisfeitos.

$$PPD = 100 - 95 \exp^{(-0.03353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2)} \quad (2.78)$$

A ISO 7730:1994 [57] define um leque de outras regras de conforto térmico, nomeadamente numa categoria de ambiente interior C (Nível expectável moderado), uma assimetria da temperatura radiante de janelas com valores inferiores a 35 °C (em relação a um plano vertical 0.6 m). A velocidade do ar deve ser no Verão inferior a 0.25 m/s, com temperaturas entre 23 e 26°C, no entanto de acordo com os critérios regulamentares do RSECE [3], deverá obter-se velocidades inferiores a 0.2 m/s. A diferença de temperatura do ar

a 1.1 m e a 0.1 m acima do chão não deve exceder 4°C e a temperatura do chão deve situar-se entre 19 e 26°C.

### *2.2.2 Análise do grau de insatisfação*

A qualidade de ar interior reflecte o impacto dos contaminantes que circulam no espaço onde habitamos, trabalhamos e respiramos durante muitos anos. A realidade mostra uma vivência exacerbada em ambientes interiores com fonte de contaminantes e gases que adquirem um papel negativo na saúde dos ocupantes.

Um ambiente interior com uma ventilação de ar novo inadequada promove o desenvolvimento de níveis elevados de contaminantes, fungos, bactérias e poeiras. Por outro lado a permanência de pessoas no interior de espaços são fonte geração de CO<sub>2</sub> proveniente do processo respiratório, de humidade específica associada à libertação de carga latente através do processo de sudoreção e respiração, e de partículas provenientes da escamação epidérmica. As actividades inerentes resultantes da utilização de aerossóis, tintas, fumos, produtos de limpeza, fotocopiadoras, sistemas de climatização e materiais de revestimento imobiliário, catapultam a concentração de alguns componentes para valores largamente superiores aos ambientes exteriores. A mistura de todos os componentes no ar provoca um “cocktail”, resultando num impacto extremamente negativo no sistema respiratório do ser humano, que a médio e longo prazo podem provocar doenças respiratórias.

Desta forma importa fomentar a importância de uma ventilação capaz de incrementar o nível de conforto térmico ocupacional, minimizar o risco de doenças e manter presente a eficiência energética. Obviamente que para o cenário de previsão do aumento do caudal de ar mínimo de ar novo, seja preferível reduzir as fontes de poluição interiores e adaptar preferencialmente um caudal de ar novo às actuais necessidades do espaço.

A origem de uma má qualidade de ar interior remete para a crise energética na década de 70, resultando na construção de novos edifícios com volumetrias mais reduzidas e uma ventilação primordialmente por recirculação de ar com uma quantidade mínima de ar novo. A dualidade de conceitos é distorcida de uma ventilação para o conforto invés de uma ventilação para a saúde, minimizado a quantidade de ar a ser arrefecido ou aquecido, e promovendo a poupança energética. A aplicação desta metodologia durante vários anos reverbera numa situação denominada pelo SED, termo esse que descreve a presença de sintomas não específicos agudos na maioria dos ocupantes, como um conjunto complexo de sintomas de irritação de mucosas, olhos, garganta, dores de cabeça, odores e náuseas. Outros casos, que ocorrem em menor número, são os de problemas infecciosos, como o caso da doença do legionário, doença que foi imputada aos sistemas de ar condicionado, resultante da contaminação do ar de insuflação por um microrganismo (*Legionella*) oriundo de torres de arrefecimento devido a condições de temperatura e humidade específica elevada.



A problemática da qualidade do ar interior reside na determinação do poluente ou poluentes que provocam a doença no ocupante ou mesmo se a poluição do ar interior é o problema. A capacidade sensorial do ser humano reage de forma logarítmica à presença imediata de alguns poluentes, no entanto existem outros poluentes que não são detectados e as fontes de geração podem contudo ser vagas e de difícil atribuição de causa específica.

Torna-se extremamente dispendioso economicamente e de difícil detecção ou medição, os contaminantes no ar interior, pelo que a utilização de um gás traçador como o CO<sub>2</sub> revela um bom indicador de qualidade de ar interior. Os níveis de CO<sub>2</sub> num espaço são um indicador da ocupação e do caudal volúmico. O CO<sub>2</sub> por si só não deve ser considerado como um contaminante ou poluente no ar interior dado que os seres humanos são a maior fonte de produção, no entanto níveis acima de 984 ppm é um indicador que a introdução de ar novo no espaço é insuficiente para a diluição do nível de concentração de CO<sub>2</sub>. O valor limite de concentração de CO<sub>2</sub> numa média temporal ponderada de 8 horas de exposição e 40 horas de trabalho semanal é de 4581 ppm. O limite máximo de concentração de CO<sub>2</sub> num período máximo de exposição de 15 minutos é de 27491 ppm [58].

Ocupantes sujeitos a níveis de concentração interiores de CO<sub>2</sub> acima dos 1000 ppm, apresentam sintomas de insatisfação e uma percepção de má qualidade de ar interior ao nível do desconforto e irritação [59]. O RSECE [3] apresenta como valor máximo de referência para o CO<sub>2</sub> cerca de 1800 mg/m<sup>3</sup> (984 ppm para as condições de temperatura de 20 °C e pressão de 1 atm (101.325 kPa)), no entanto para efeitos de estudo arredonda-se o valor limite para 1000 ppm.

A taxa de CO<sub>2</sub> gerado num espaço depende do número de ocupantes, do seu tamanho e do seu nível de actividade (em maior detalhe no Capítulo 3, secção Taxa de Produção de CO<sub>2</sub>).

Caso exista geração de outros contaminantes numa razão que dependa igualmente dos níveis de ocupação então o CO<sub>2</sub> é um indicador favorável da concentração desses contaminantes. No entanto apenas alguns contaminantes são gerados numa taxa dependente da ocupação, sendo outros sem função da ocupação, como é o caso das emissões de COV's do material mobiliário e contaminantes introduzidos pelo exterior. Neste caso o CO<sub>2</sub> não fornece informação necessária da concentração dos contaminantes emitidos, pelo que não pode ser correlacionado.

Ao mesmo tempo que a produção de CO<sub>2</sub> dos seres humanos ocorre numa razão proporcional à taxa de metabolismo [13], simultaneamente são produzidos odores de bioefluentes (designado por odores corporais emitidos pelo processo de sudoreção e por secreções sebáceas através da epiderme e sistema digestivo). A correlação entre a taxa de produção de CO<sub>2</sub> e os odores de bioefluentes é forte, ambos derivados de uma dependência primária do nível de actividade física. Dados experimentais conduzidos em zonas de ocupação revelaram que os ocupantes conseguiram avaliar o nível de aceitabilidade do espaço em termos de odores corporais [60].

Num espaço onde os ocupantes sedentários são as fontes de poluição exclusivas, a relação entre a previsibilidade de insatisfação da qualidade de ar interior em função da concentração de CO<sub>2</sub> (acima do valor de concentração do exterior) é dado pela seguinte equação (2.79) onde o termo C<sub>CO<sub>2</sub></sub> representa o valor da concentração de CO<sub>2</sub> acima da concentração exterior.

$$PD = 395 \cdot \exp(-15.15 \cdot C_{CO_2}^{-0.25}) \quad (2.79)$$

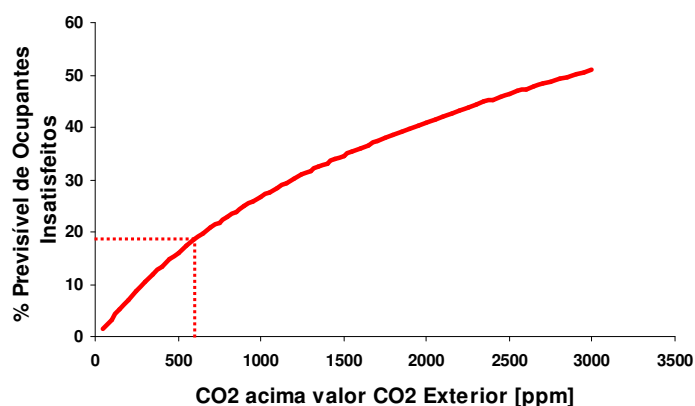


Figura 2.12: Previsão de insatisfação da qualidade de ar interior em função da concentração de CO<sub>2</sub> acima do valor exterior.

Através da Figura 2.12 verifica-se que para uma concentração de 600 ppm acima de uma concentração exterior (assumindo 450 ppm), obtém-se uma concentração interior de 950 ppm, onde 81.5 % dos ocupantes que entram no espaço interior consideram aceitável o nível de qualidade de ar interior em termos de odores corporais.

A percepção do ser humano relativamente à qualidade do ar baseia-se em dois sentidos: O sentido do olfacto, situado na cavidade nasal e caracterizado pela sensibilidade a milhares de odores no ar e o sentido geral químico, situado por todas as membranas mucosas, no nariz e olhos, com características de sensibilidade a inúmeras irritações no ar. A reacção combinada destes dois sentidos permitem ao ser humano perceber se ar é fresco, agradável, pesado ou irritante.

Face à existência de um ar poluído por bioefluentes humanos, a Figura 2.13 mostra a percentagem de insatisfação em função do caudal volúmico por pessoa (baseado num trabalhador adulto sentado com uma sensação termicamente neutra). A evolução logarítmica da percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos é dada por (2.80) e (2.81).

$$PD = 395 \cdot \exp(-1.83 \cdot q^{0.25}) \quad \text{com } q \leq 0.32 \text{ l/s.olf} \quad (2.80)$$

$$PD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad \text{para } q \leq 0.32 \text{ l/s.olf} \quad (2.81)$$

Onde PD é a percentagem previsível de ocupantes insatisfeitos com a qualidade de ar percebida [%] e q o caudal volúmico por unidade de quantidade de poluição [l/(s.olf)].

A poluição gerada pelo ocupante caracterizado anteriormente é designada por um “olf”. A qualidade do ar percebida pelo ocupante pode igualmente ser expresso em decipol (dp), onde 1 dp é a qualidade do ar num espaço, com uma forte fonte de poluição de um “olf”, com um caudal de ar novo de 10 l/s, onde  $1 \text{ dp} = 0.1 \text{ olf} / (l/s)$ .

A prENV1752:1997 [13] define as exigências e a metodologia de caracterizar a qualidade do ar interior em edifícios (excluindo edifícios habitacionais e complexos industriais), adoptando três classes de conforto (A, B e C) em conformidade com a percepção da qualidade do ar. As três classes de conforto correspondem respectivamente a diferentes percentagens de ocupantes insatisfeitos (<15%, <20% e <30%) e caudais volúnicos requeridos de 10, 7 e 4 l/s.olf, em destaque na Figura 2.13 com correlação à Tabela 2.2.

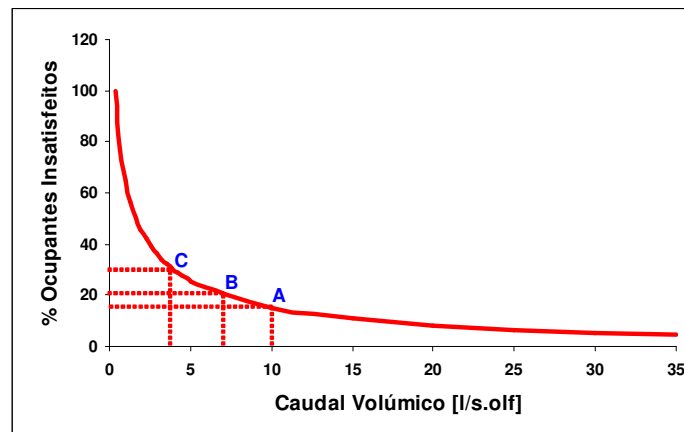


Figura 2.13: Percentagem de insatisfeitos face ao caudal volúmico (extraído de [13]).

Tabela 2.2: Categorização da qualidade de ar perceptível (extraído de [13]).

Categoria	Qualidade de Ar perceptível		Caudal Volúmico de Ar Requerido [l/s.olf]
	% Insatisfeitos	dp	
A	15	1.0	10
B	20	1.4	7
C	30	2.5	4

## 2.2.3 Eficácia de ventilação

O nível de qualidade do ar interior pode não ser o mesmo por todo o volume interior ventilado, embora a zona de respiração dos ocupantes, desde o solo até 2 metros de altura [9], seja a zona que realmente importa analisar. Uma distribuição estratificada da qualidade do ar no espaço provoca um impacto nos requisitos de ventilação.

A eficácia de ventilação depende da distribuição do ar e da localização das fontes poluentes no espaço, resultando num grau de complexidade superior quando diferentes poluentes apresentam diferentes níveis de concentrações.

A característica de uma eficácia de ventilação apresentar o valor 1, resulta numa mistura completa dos poluentes no ar do volume do espaço. Caso a qualidade do ar na zona de respiração for superior à extracção, a eficácia de ventilação toma um valor superior a 1 e a qualidade de ar desejada na zona de respiração pode ser alcançada com uma redução do caudal de ar novo. De forma antípoda, uma redução do nível de qualidade do ar na zona de respiração face ao ar extraído, a eficácia de ventilação apresenta um valor menor que 1, sendo necessário incrementar o caudal volúmico de ar novo.

A eficácia de ventilação integra-se em função da localização, das características dos elementos terminais de difusão de ar e das fontes de poluição. Além disso é função da temperatura e do caudal volúmico de insuflação. A determinação da eficácia de ventilação pode ser obtida através da modelação em CFD ou através de um processo de medições experimentais em diversos pontos do espaço.

A estimativa da eficácia de ventilação numa análise de escoamento obedece a uma divisão primária da zona ocupada da zona de insuflação. No método de ventilação cruzada a zona de insuflação demarca-se acima da zona de respiração dos ocupantes, sendo atingidas as condições óptimas quando a mistura é de tal ordem eficiente que transforma duas zonas em apenas uma. No caso do método por deslocamento as melhores condições são obtidas enquanto permanecer uma estratificação entre a insuflação na zona de ocupação e a extracção na zona acima da ocupação.

A idade média do ar no volume de controlo é um indicador coerente da eficácia de ventilação, pelo que caso o seu valor na zona ocupada seja inferior ao valor acima da zona ocupada, fica demonstrado uma boa eficácia de ventilação.

Apresentam-se de seguida as diferentes metodologias e dados padronizados de eficácia de ventilação para a prENV1752:1997 [13] e a ASHRAE Standard 62.1:2004 [9].

Na prENV1752:1997 [13] é apresentada a equação de cálculo da eficácia de ventilação apenas com base na concentração de  $\text{CO}_2$ , conforme (2.82), com  $\varepsilon_v$  designada por eficácia de ventilação,  $C_{\text{ext}}$  a concentração de  $\text{CO}_2$  na extracção,  $C_s$  a concentração de  $\text{CO}_2$  na insuflação e  $C_i$  a concentração de  $\text{CO}_2$  na zona da respiração.

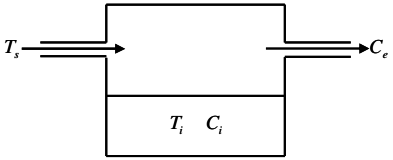
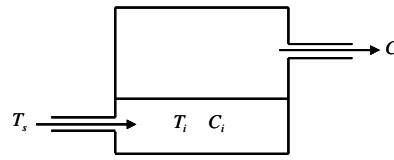
$$\varepsilon_v = \frac{C_{\text{ext}} - C_s}{C_i - C_s} \quad (2.82)$$

A prENV1752:1997 [13] considera igualmente um método de determinação da eficácia de ventilação com base nos diferentes métodos de ventilação de acordo com as assimetrias térmicas verticais.

A Tabela 2.3 expressa para o método cruzado e para o método de deslocamento, a eficácia de ventilação face à estratificação térmica da zona ocupada e da zona de insuflação ou zona não ocupada, considerando o impacto do método de ventilação e da temperatura do ar de insuflação, assumindo uma distribuição homogénea de poluentes pelo espaço ventilado.

Através da análise CFD é permitida a identificação de focos de concentração de CO<sub>2</sub> e consequente correcção através da variação do ângulo de insuflação ou incremento mínimo do caudal de ar novo de insuflação.

Tabela 2.3: Eficácia de ventilação dos métodos de ventilação prENV1752:1997 (extraído de [13]).

Ventilação Cruzada		Ventilação Deslocamento	
			
Diferença de temperatura entre a Insuflação e zona de respiração $T_s - T_i$ [°C]	Eficácia de Ventilação	Diferença de temperatura entre a Insuflação e zona de respiração $T_s - T_i$ [°C]	Eficácia de Ventilação
< 0	0.9 – 1.0	< 0	1.2 – 1.4
0 – 2	0.9	0 – 2	0.7 – 0.9
2 – 5	0.8	> 2	0.2 – 0.7
> 5	0.4 – 0.7		

No âmbito da ASHRAE Standard 62.1:2004 [9], o valor  $V_{\text{resp}}$  obtido da equação (1.2) no Capítulo 1 na secção das Técnicas de Garantia da Qualidade Interior e Conforto Humano, é afectado pelo valor de eficácia de ventilação obtido da Tabela 2.4 para diferentes configurações de distribuição de ar. O valor da eficácia de ventilação relaciona-se com a estratificação do ar e encontra-se nesta norma dependente de forma implícita e simplificada com a diferença relativa entre a temperatura do ar na sala e na insuflação.

Tabela 2.4: Eficácia de ventilação para as configurações de distribuição do ar ASHRAE Standard 62.1:2004 (extraído de [9]).

Configuração da distribuição do ar	Eficácia ventilação $\varepsilon_v$
Insuflação no solo e retorno no tecto, garantindo uma ventilação por deslocamento de baixa velocidade num sentido unidireccional, com estratificação térmica	1.2
Ar de recirculação insuflado pelo lado oposto à exaustão ou ao retorno	0.8
Ar de recirculação insuflado perto à exaustão ou ao retorno	0.5

Desta forma os caudais mínimos de ar novo previstos na prENV1752:1997 [13], ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e RSECE [3] deverão ser agravados no seu denominador pelo valor correspondente à configuração de distribuição de ar ou metodologia de ventilação prevista na Tabela 2.3 e Tabela 2.4, incrementando o seu valor global. Considera-se contudo no método de mistura, uma distância entre a grelha de insuflação e grelha de retorno ou exaustão suficientemente elevada para considerar o valor de 0.5 por eficácia de ventilação, pelo que se considera com referência o valor de 0.8.

## 2.3 Conclusões

Neste capítulo pretendeu-se apresentar no âmbito da análise CFD e de uma forma geral, a arquitectura de geração do modelo numérico em FLUENT® e a discretização das equações de estado de conservação da massa, momento, energia e transporte de espécies, e como modelo de radiação, o método de radiação de ordenadas discretas (DO). O modelo de turbulência apresentado é o *indoor zero equation*, justificado anteriormente no capítulo 1, na secção Revisão Bibliográfica, na secção Modelos de Turbulência, assumindo por base um compromisso razoável entre o precisão de valores obtidos e o tempo de cálculo dispendido, apresentando uma rápida previsão do escoamento e transporte de contaminantes.

Os métodos multi-malha adoptados, nomeadamente o V e o Flex, permitem acelerar a convergência da solução através do cálculo das correcções numa série de níveis de refinação de malhas. A recorrência a este método permite reduzir drasticamente o número de iterações e o tempo requerido de computação para obter a solução convergida, particularmente quando o modelo contém um número relativamente elevado de volumes de controlo.

No âmbito do conforto térmico apresentam-se as equações de determinação do índice de conforto térmico PMV, pelo que o mesmo deverá ser obtido nos resultados do modelo numérico. A percentagem de pessoas insatisfeitas será calculada em conformidade com o índice de PMV na obtenção das assimetrias verticais. Por último apresenta-se em

conformidade com a prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] os diferentes valores de eficácia de ventilação como alvo de comparação com os resultados numéricos a obter.





### 3 Implementação do caso de estudo

O tema de estudo pretende a criação de um modelo em CFD para uma sala de aula típica, que através da utilização de diversos métodos de ventilação permita garantir o compromisso de um conforto térmico e qualidade do ar interior aliado a um padrão de eficiência energética. A interacção da aplicação de uma diversidade de métodos de ventilação com as cargas térmicas no volume de controlo, permite avaliar a variação comportamental dos parâmetros de análise, tais como a velocidade e temperatura do ar, a concentração do CO<sub>2</sub>, a idade média do ar e a trajectória de partículas, as assimetrias térmicas, o índice de conforto térmico e a percentagem de pessoas insatisfeitas. A obtenção das cargas térmicas no software DESIGN BUILDER® permitiu integrar os parâmetros de entrada no motor de cálculo FLUENT®.

Desta forma o recurso a um software de simulação de uma sala de aula em CFD permite o desenvolvimento de um modelo geométrico, composto pelos diversos elementos construtivos e características térmicas inerentes, e simulação da actividade metabólica, da geração de espécie CO<sub>2</sub>, das cargas térmicas internas derivado de iluminação, fluxos térmicos pelas envolventes e envidraçados, e balanços energéticos de caudal mássico de ar recirculado e ar novo.

As simulações efectuadas em modo de arrefecimento adoptam diversos métodos de ventilação por diluição de poluentes (Método de Mistura, Método Cruzado e Método por Deslocamento), de forma a avaliar o efeito de agravamento de caudal de ar novo por eficácia de ventilação. Pretende-se obter em compromisso, um estudo integrado da optimização do ângulo de insuflação dos elementos de difusão de ar, de forma a corrigir caso possível, zonas de elevada concentração de CO<sub>2</sub> e melhorar a eficácia de ventilação sem agravamento do caudal de ar novo. Por conseguinte, pretende-se atingir uma melhor distribuição do ar, promovendo um índice de conforto térmico PMV com proximidade ao valor neutro. No caso de ainda incumprimento dos valores regulamentares estipulados no RSECE, deve proceder-se à adopção de um incremento no caudal de ar novo de forma a melhorar a concentração de CO<sub>2</sub> para valores regulamentares, comparando com os valores estabelecidos na prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9].

A selecção da temperatura e velocidade de insuflação de acordo com os métodos de ventilação, assumem particular relevo no método de deslocamento, dado a necessidade de garantir que temperaturas demasiado baixas, não proporcionem um arrefecimento indesejado e potenciem o risco de desconforto térmico (arrefecimento na zona inferior do corpo) perto das grelhas de insuflação. Pretende-se igualmente que velocidades de insuflação superiores a 0.5 m/s não sejam atingidas [61].

A simulação em CFD apresenta resultados de distribuição espacial de velocidade e temperatura do ar, concentração de CO<sub>2</sub>, idade média do ar e trajectória de partículas, e índice de PMV. Após o desenvolvimento das rotinas no motor de cálculo, os dados são exportados

para após processamento com a capacidade de produzir a imagem dos resultados numa geometria tridimensional, sob diversas formas. Os resultados gráficos dos cortes horizontais e/ou verticais do espaço são apresentados numa paleta de cores de acordo com os gradientes de valores correspondentes.

### 3.1 Cálculo de carga térmica

A pretensão nesta secção resulta da recorrência de um software de carga térmica que permita a modelação 3D dos parâmetros variáveis que influenciam o comportamento térmico de um modelo geométrico, caracterizado para este estudo como uma sala de aula. Os dados resultantes do cálculo de carga térmica permitem a parametrização de um novo modelo a integrar no motor de cálculo para análise em CFD.

O caso estudo envolve uma geometria rectangular simulando uma sala de aula com a pretensão de cumprir os requisitos de eficiência energética e conforto térmico, conforme as linhas de cumprimento legal de [3] [5].

O processo de criação do modelo geométrico envolve a dinâmica de uma arquitectura com desenvolvimento de todos os elementos construtivos que constituem o volume de análise. O modelo de cálculo é constituído pelas diferentes peles constituintes dos elementos exteriores de zonas opacas verticais e horizontais, com as condições de fronteira (LxAxP) definidas respectivamente por um comprimento de 7 metros, um pé direito de 3 metros e uma largura de 5 metros. Os elementos envidraçados apresentam dimensões de uma altura de 1.2 metros e 1.6 metros de largura sob a orientação Oeste, cumprindo os valores limite de qualidade térmica, com uma área superior a 5% da área útil de pavimento do espaço que servem e não orientados entre noroeste e nordeste. O resultado após renderização encontra-se na Figura 3.1 com a orientação Norte indicada pela direcção da seta.



Figura 3.1: Renderização do modelo geométrico para análise de carga térmica.

Para efeito de estudo consideram-se os coeficientes de transmissão térmica de referência para elementos exteriores e interiores em zonas opacas horizontais e verticais, e o factor solar

do vão envidraçado conforme o RCCTE [5]. No âmbito de estudo, a zona climática correspondente para Lisboa, na estação de Verão e Inverno é de respectivamente V2 Sul, I1, sem correcção climática por efeito de altitude.

A carga térmica do modelo integra a carga sensível associada ao perfil de iluminação e ocupação constante, a carga latente derivada da respiração e a transferência de calor por condução, convecção e radiação, correspondendo aos parâmetros de entrada no software de cálculo de carga térmica, para obtenção das condições térmicas. A sala de aula integra uma ocupação máxima de sete pessoas, correspondendo a um ocupante de pé com actividade moderada e seis pessoas sentadas com actividade ligeiramente moderada. O cálculo das cargas térmicas para as condições de projecto na situação de arrefecimento foi estabelecido com os perfis de ocupação e iluminação definidos para um padrão de 100% da capacidade máxima durante as duas horas de aulas entre as 14:30h e 16:30h. Os balanços energéticos ao modelo serão efectuados com os caudais de ventilação de ar novo especificados em [3] por tipologia, sendo os mesmos obtidos no Capítulo 4 Resultados.

A Tabela 3.1 representa as especificações do modelo para simulação de parâmetros térmicos.

Tabela 3.1: Dados de entrada no software DESIGN BUILDER®.

Parâmetro	Valor
<b>Dimensões (LxAxP) [m]</b>	5x3x7
<b>Orientação do modelo</b>	Parede de 5m com orientação Este-Oeste
<b>Coefficiente Transmissão térmica [W/ m<sup>2</sup>K]</b>	Envolvente Exterior Vertical: 0.7 Cobertura: 0.5 Chão: 0.5
<b>Vão envidraçados (LxA) [mxm]</b>	1.6x1.2
<b>Coefficiente transmissão Térmica do envidraçado [W/ m<sup>2</sup>K]</b>	3.16
<b>Factor solar do vidro</b>	0.78
<b>Iluminação [W/ m<sup>2</sup>]</b>	20
<b>Taxa de metabolismo de ocupação</b>	6 ocupantes sentados – 1.2 met 1 ocupante de pé – 1.6 met
<b>Perfil de ocupação e iluminação</b>	Perfil 100% - 14:30 às 16:30h
<b>Caudal mínimo de ar novo [m<sup>3</sup>/h.ocup]</b>	30
<b>Temperatura de insuflação [°C]</b>	$T_{\text{int erior}} - 8 < T_{\text{ins}} < T_{\text{int erior}} - 12$

Os dados obtidos do cálculo de carga térmica, são apresentados na Tabela 3.2 com os valores dos fluxos de calor correspondente aos valores máximos atingidos entre as 14:30h e as

16:30h nas paredes exteriores, tecto e chão, sendo posteriormente utilizados para introdução no motor de cálculo.

Tabela 3.2: Fluxos de calor através das envolventes da sala de aula.

<b>Envolvente Construtiva</b>	<b>Ganho Térmico [kW]</b>	<b>Fluxo de Calor [W/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Parede Norte</b>	0.0106	0.79
<b>Parede Sul</b>	0.0909	6.06
<b>Parede Este</b>	0.1784	8.49
<b>Parede Oeste</b>	0.0622	1.8
<b>Tecto</b>	-0.0560	-1.6
<b>Chão</b>	-0.1558	-4.45

No intervalo de tempo de realização das aulas, os envidraçados atingem um valor máximo da sua superfície de 29 °C.

Para efectivar o balanço energético à sala de aula obteve-se como resultado do cálculo das cargas térmicas um caudal volúmico de 0.558 m<sup>3</sup>/s, contemplando o caudal de ar novo previsto anteriormente de cerca de 30 m<sup>3</sup>/h.ocup (perfazendo um caudal volúmico total para os sete ocupantes de 0.058 m<sup>3</sup>/s) e um caudal volúmico de recirculação por diferencial de 0.5 m<sup>3</sup>/s.

Pretende-se através da seguinte Figura 3.2 avaliar de forma expedita a qualidade de resultados correlacionando a adopção do sistema de climatização UTAN (Unidade de Tratamento de Ar Novo) com recuperação térmica acoplada a uma unidade terminal de climatização para correcção térmica) com o conforto térmico no espaço. Desta forma denota-se durante o período de funcionamento do sistema de climatização uma temperatura de ar interior de 24 °C e humidade relativa de 50%, perspectivando um óptimo conforto térmico.

A Figura 3.3 e Figura 3.4 retrata em condições antípodas o comportamento térmico imediato do aumento de temperatura da superfície exterior da envolvente do edifício relativamente à incidência solar durante o período da manhã na orientação Este e durante o período da tarde na orientação Oeste. Os valores de temperatura da superfície exterior da parede traduzem o valor do coeficiente de absorção adoptado de 0.6, correspondendo a uma cor escura. A consideração de uma inércia térmica média reflecte o “delay” no balanço térmico expresso na Figura 3.3, com os valores de fluxo térmico por condução apresentando um ponto de inflexão apenas às 13 horas face a uma temperatura máxima atingida na parede às 8.30h.

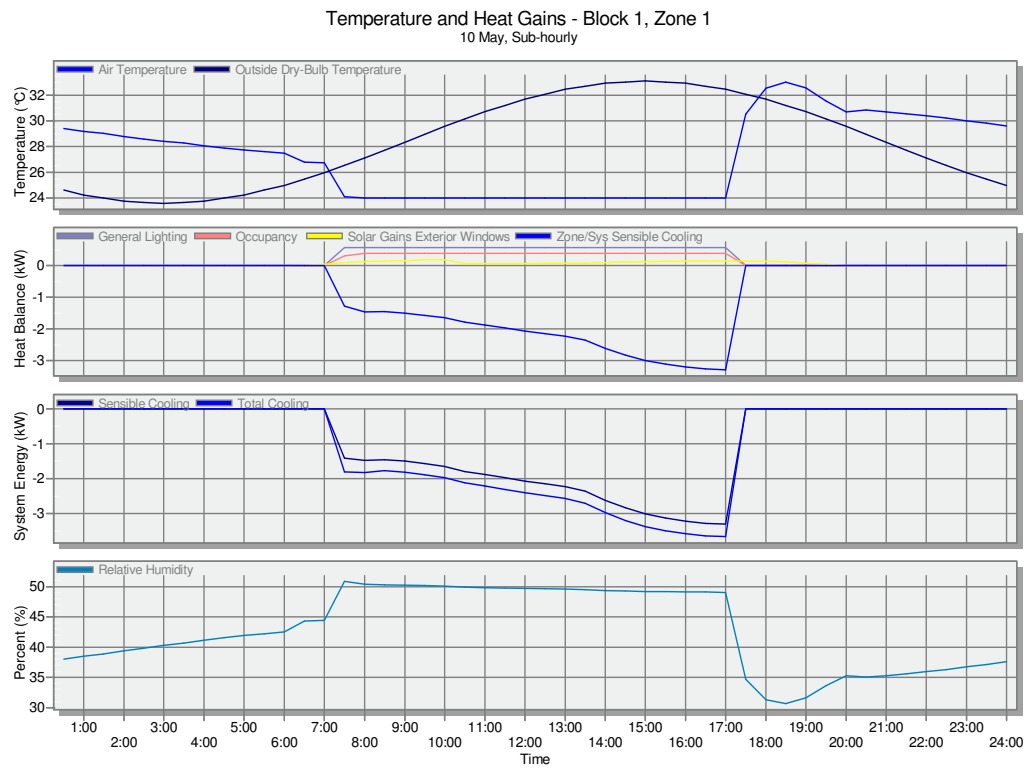


Figura 3.2: Análise gráfica das cargas térmicas da sala de aula obtida do software DESIGN BUILDER®.

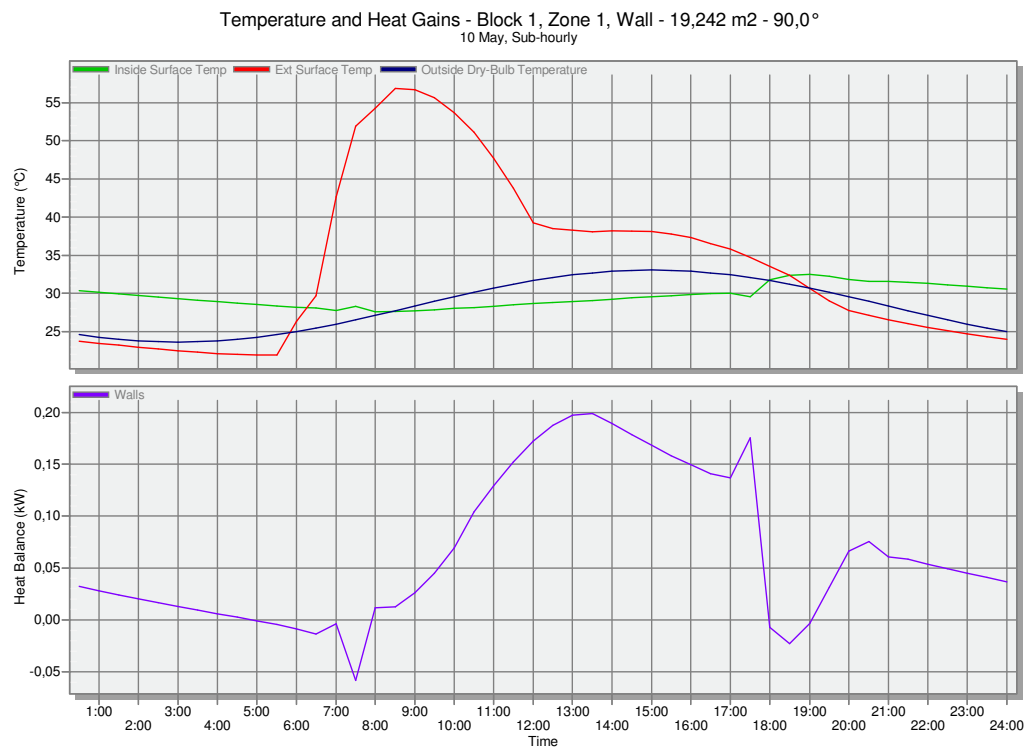


Figura 3.3: Análise gráfica das cargas térmicas da envoltura Este obtida do software DESIGN BUILDER®.

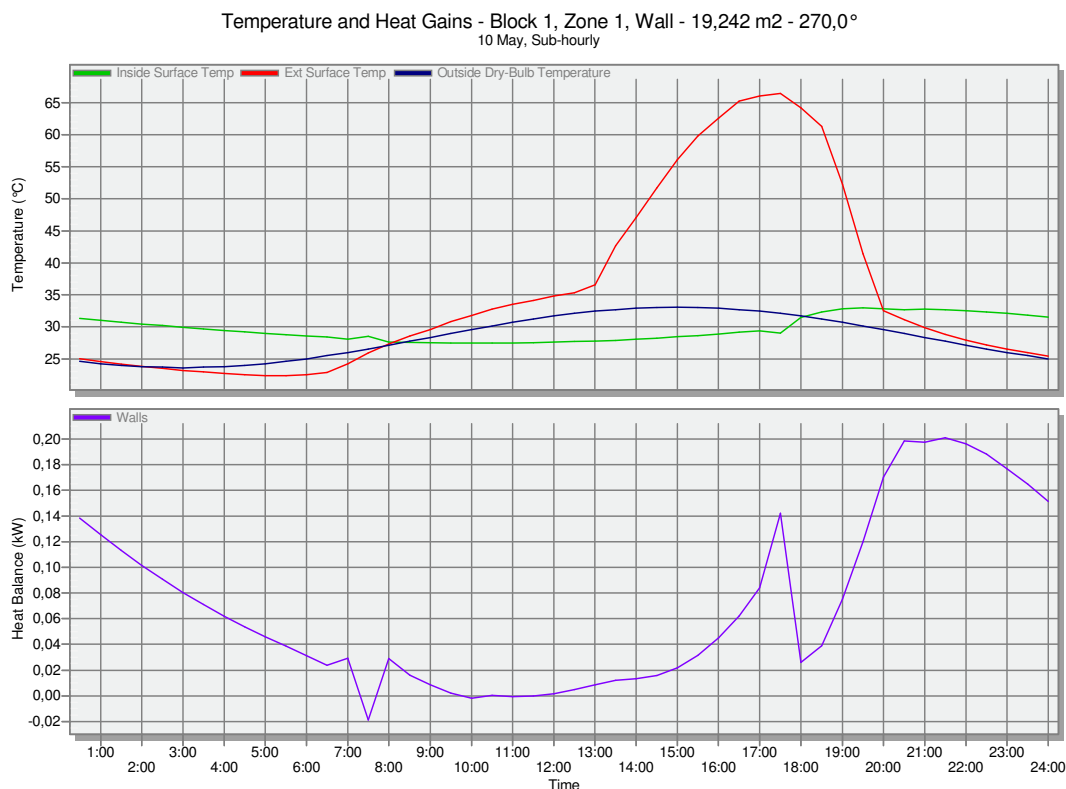


Figura 3.4: Análise gráfica das cargas térmicas na envolvente Oeste obtida do software DESIGN BUILDER®.

No Anexo I encontram-se os restantes dados obtidos do cálculo de carga térmica para uma consulta mais detalhada.

## 3.2 Aplicação do modelo CFD

Neste Capítulo pretende-se formular o nosso modelo geométrico através da consideração das variáveis de entrada constantes para o cálculo da solução matemática no motor de cálculo FLUENT®.

São resolvidas as equações de conservação da massa, momento, energia e espécies para as rotinas de cálculo que integram os diferentes métodos de ventilação. O regime temporal transiente adoptado define um intervalo de tempo de 120 minutos (tempo de aula) para um período máximo de 125 minutos (7500 segundos) em conformidade com a metodologia adaptada [62] onde: “O PQ (Perito Qualificado) deve realizar, no âmbito da preparação e planeamento da auditoria à QAI, uma verificação expedita inicial da concentração de CO<sub>2</sub> no edifício ou fracção autónoma, durante o seu período normal de funcionamento (por exemplo, 2 a 3 horas após o início da ocupação”. Durante o intervalo de tempo definido consideram-se

injecções de espécie de  $\text{CO}_2$  associado ao processo respiratório de um ser humano e introdução de ar novo com valor de concentração de  $\text{CO}_2$  exterior de 450 ppm.

A equação de energia para obtenção do campo de temperaturas será resolvida em conjunto com as equações de escoamento (Velocidade/Pressão). A transferência de energia por radiação corresponde a quantidade escalar derivada, sendo activada, através da utilização do Método de Radiação Ordenadas Discretas, em detalhe no Capítulo 2. O motor de cálculo resolve as equações de transporte para o modelo de ordenadas discretas a cada 5 iterações de forma a reduzir o tempo de cálculo.

O problema inicial contempla a introdução da espécie  $\text{CO}_2$ , numa concentração inicial de 296 ppmV (Partes Por Milhão em Volume) ou 450 ppm, para posterior análise da qualidade do ar interior. O índice de conforto térmico será mensurado através da análise do índice de PMV. É determinado se o escoamento se encontra no domínio da convecção forçada ou natural. Em caso de convecção forçada são calculados os seguintes números adimensionais, Número de Reynolds (Re) e Número de Peclet (Pe). O Número de Reynolds mede a importância relativa das forças de inércia e das forças viscosas. Valores acima de 2000 indicam uma dominância das forças de inércia face às forças viscosas, tornando o escoamento turbulento. O Número de Peclet similar ao Número de Reynolds mede a importância relativa da advecção do escoamento face à difusão no transporte de calor. Valores baixos indicam uma presença de fenómenos de difusão e valores elevados indicam que o movimento é dominado pelo escoamento. Os valores calculados de Re e do Pe é respectivamente 62896 e 46739, revelando a presença de um escoamento turbulento.

O escoamento neste modelo é sujeito ao efeito da aceleração da gravidade na componente vertical y com o valor de  $-9.80665 \text{ m/s}^2$ . Dado o modelo conter duas espécies (Ar e  $\text{CO}_2$ ), deverá utilizar-se uma aproximação ao modelo de gás ideal. A pressão considerada no modelo é a pressão atmosférica com o valor de  $101325 \text{ N/m}^2$ , com uma massa específica do ar de  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.3 Condições do modelo

A criação do modelo geométrico no FLUENT® obedece às dimensões de uma sala de aula com as dimensões (LxAxP) de 5 metros, 3 metros e 7 metros, conforme a Figura 3.1. A sala de aula contempla a nível de elementos construtivos quatro envolventes verticais, duas envolventes horizontais e dois envidraçados.

Através da Tabela 3.2 na anterior secção, utilizam-se os valores máximos dos fluxos de calor atingidos entre as 14:30h e as 16:30h nas paredes exteriores, tecto e chão, para introdução no campo de dados térmicos do modelo, no motor de cálculo. Relativamente aos dois elementos envidraçados que constituem a parede Oeste, considerou-se uma temperatura da sua superfície interior de  $29^\circ\text{C}$ . A iluminação é conseguida através de seis armaduras

uniformemente distribuídas pelo layout da sala de aula, pelo que considerando uma taxa de iluminação de  $20 \text{ W/m}^2$ , totaliza uma potência de  $700 \text{ W}$ . A ocupação da sala de aula distingue-se por diferentes tipos de actividade. A taxa metabólica consoante o tipo de actividade é obtida de [63] e descrita na seguinte Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Valores típicos para diversos níveis de actividade (extraído de [63]).

Tipo de Actividade	Taxa de Metabolismo [met]
Sentado em repouso	1.0
Escrever	1.2
Andar (0.9 m/s)	2.0
Limpeza	2.0-3.4
Exercício físico	3.0-4.0

A ocupação da sala de aula é constituída por seis ocupantes sentados com uma actividade física a escrever, caracterizando-se pela Tabela 3.3 com um metabolismo de 1.2 met. O ocupante de pé caracteriza-se com actividade física entre o escrever e o andar, pelo que através da interpolação do valor de metabolismo na Tabela 3.3, corresponde a um valor de 1.6 met. A indumentária dos ocupantes é factor determinante na posterior obtenção do campo de índice PMV para análise de conforto térmico. A caracterização da indumentária é efectuada através do somatório dos valores de isolamento térmico para as diversas peças de vestuário, denominado por  $I_{clo}$  [13]. Desta forma o ocupante é constituído com os seguintes valores de  $I_{clo}$  apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Isolamento térmico de peças de vestuário (extraído de [13]).

Peça de Indumentária	Isolamento Térmico Vestuário $I_{clo}$ [clo]
Roupa interior	0.03
Camisa	0.2
Calças	0.25
Meias de verão	0.02
Sapatos sola fina	0.02
$\Sigma I_{clo}$	<b>0.52</b>

O balanço energético no volume de controlo, de forma a vencer as cargas térmicas associadas, é efectuada através da previsão de um sistema de climatização para garantia da qualidade de ar interior e conforto térmico. A Figura 3.5 e a Figura 3.6 apresentam



respectivamente a simulação dos elementos terminais de difusão de ar associados ao sistema de climatização e ventilação para o método mistura e cruzado, e deslocamento. Em ambos os modelos prevê-se um balanço energético através da circulação de caudais mássicos de ar através de duas grelhas de insuflação (numericamente representadas pelo n.º 1 a grelha de ar novo e pelo n.º 2 a grelha do caudal de insuflação retornado da grelha n.º 3) e duas grelhas de retorno e extracção (numericamente representadas pelo n.º 3 a grelha de retorno e pelo n.º 4 a grelha de exaustão) no plano de corte YZ. A grelha de insuflação de ar novo interligada à rede de condutas de uma unidade de tratamento de ar novo virtual com recuperador de calor e bateria de arrefecimento, introduz na sala de aula um caudal volúmico de 30 m<sup>3</sup>/h, com uma temperatura de insuflação definida na gama de valores aceitáveis (variação entre 8 a 12°C face à temperatura interior). O caudal mássico de recirculação obtido a partir da secção Cargas Térmicas do presente capítulo 3, é de 0.6 kg/s, com uma diferença entre a temperatura de insuflação e retorno ( $\Delta T$ ) iterada em regime transiente de -2 °C. O termo filtragem de espécies (CO<sub>2</sub>) é de obrigatoria introdução, pelo que admitiu-se um valor residual de cerca 1x10<sup>-2</sup>.

A grelha de extracção de menor dimensão interliga na unidade tratamento de ar novo para posterior recuperação térmica e exaustão. As velocidades efectivas dos elementos terminais de difusão de ar obedecem a um critério de velocidade máxima de 2.5 m/s nas grelhas de insuflação e 4 m/s nas grelhas de retorno (retorno acima da zona ocupada). No método de deslocamento a velocidade de insuflação deverá apresentar um valor menor ou igual a 0.5 m/s [61].

As simulações numéricas a efectuar, decorrem no modo de arrefecimento, pelo que a as grelhas de exaustão e retorno deverão ser localizadas com proximidade ao tecto, acima das fontes de geração de contaminantes para que a remoção seja efectuada através do gradiente térmico na pluma convectiva.

Relativamente à injeção de espécies no domínio de cálculo prevê-se a geração de CO<sub>2</sub> através dos vários ocupantes e através da grelha de insuflação de ar novo, com a introdução no regime transiente de um valor constante de concentração de 450 ppm de CO<sub>2</sub>, assumindo ser o valor de concentração exterior.

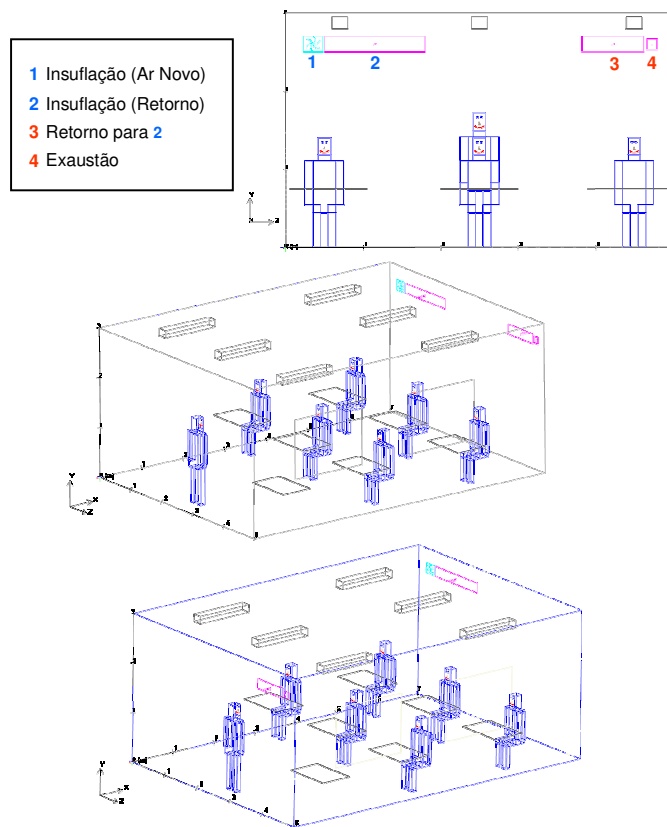


Figura 3.5: Pormenor dos elementos terminais de difusão de ar respectivamente no método de mistura e cruzado.

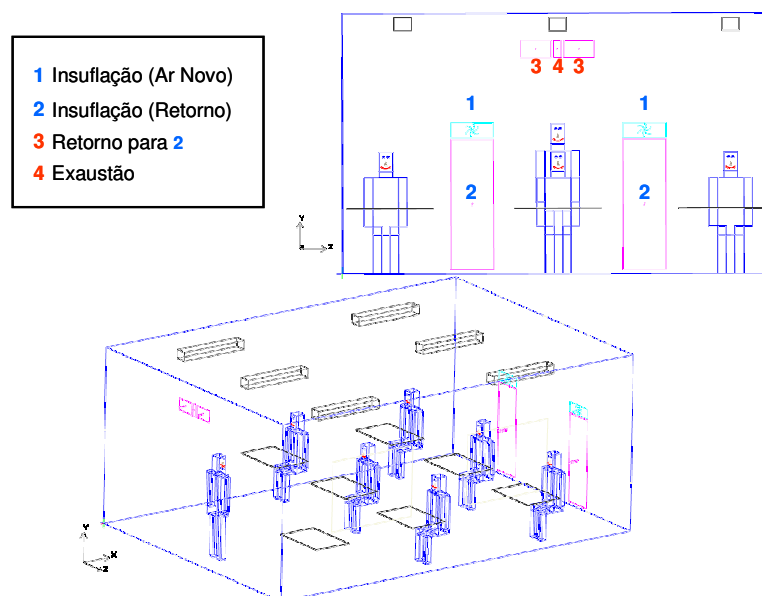


Figura 3.6: Pormenor dos elementos terminais de difusão de ar no método de deslocamento.

Relativamente à geração de CO<sub>2</sub> libertado pelos ocupantes será objecto de análise detalhado e aferição de dados na próxima secção Calibração da Injecção de CO<sub>2</sub> do presente Capítulo 3.

### 3.3.1 Calibração da injecção de CO<sub>2</sub>

O modelo numérico a desenvolver obedece à introdução de espécies no volume de controlo que simulem a actividade de produção de CO<sub>2</sub> de um ser humano. Pretende-se nesta secção determinar a geração de CO<sub>2</sub> de um ocupante de acordo com a sua actividade física, permitindo desta forma a calibração do modelo numérico mediante a análise da evolução da concentração de CO<sub>2</sub>.

#### *Taxa produção de CO<sub>2</sub>*

O ser humano produz CO<sub>2</sub> e consome oxigénio num quociente que depende primariamente da dimensão do seu corpo e do nível de actividade física. A inter relação entre a actividade física e a taxa de produção de CO<sub>2</sub> é integrada na determinação da taxa de consumo de oxigénio VO<sub>2</sub> [l/s] de uma pessoa através de (3.1), com A<sub>D</sub> [m<sup>2</sup>] a representar a área de Dubois, M (1 met = 58.2 W/ m<sup>2</sup>) [met] a representar o nível de actividade física ou taxa de metabolismo por unidade de superfície e RQ [-] a representar o quociente respiratório ou quociente volumétrico entre as taxas de CO<sub>2</sub> produzido e o O<sub>2</sub> consumido [64]. O valor de A<sub>D</sub> pode ser estimado através da equação (3.2) com H [m] a ser definido pela altura do corpo e W [kg] a representar a massa do corpo.

$$V_{O_2} = \frac{0.00276 A_D M}{(0.23 RQ + 0.77)} \quad (3.1)$$

$$A_D = 0.203 (H^{0.725} W^{0.425}) \quad (3.2)$$

A sala de aula que integra o modelo numérico terá uma ocupação de sete pessoas. O ocupante de pé apresenta uma altura de 1.75 metros e uma massa de 65 kg, perfazendo através da equação (3.2) um valor de 1.796 m<sup>2</sup>. Para os restantes seis ocupantes sentados, apresentando um valor médio de altura de 1.65 metros e uma massa média de 54 kg, o valor obtido é de 1.555 m<sup>2</sup>.

O valor de RQ (Respiratory Quocient), designado na nomenclatura portuguesa por quociente respiratório depende do tipo de alimentação, do nível de actividade física e da condição física da pessoa. O valor de referência para um adulto de estatura média e actividade

metabólica leve ou sedentária (1 met) é de 0.83. O valor de RQ aumenta para 1 no caso de o nível de actividade física ser pesado, correspondendo a um nível metabólico de 5 met. A representação dos dados encontra-se na Figura 3.7, onde através da equação de regressão linear obtida, interpolam-se os valores de RQ correspondente à actividade dos ocupantes na sala de aula.

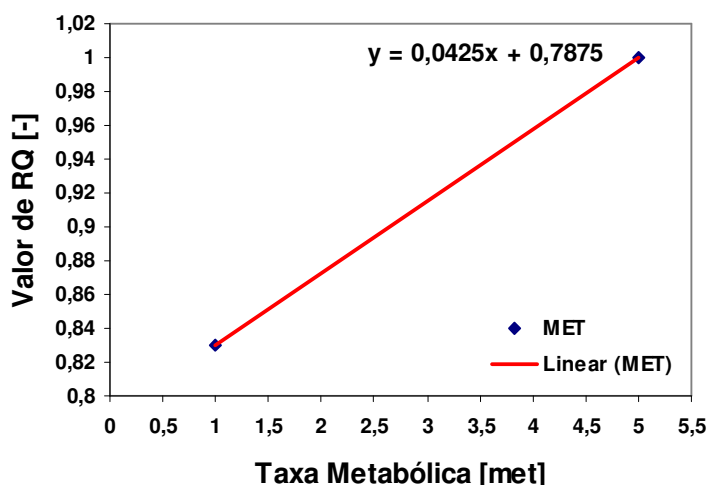


Figura 3.7: Determinação da equação de regressão linear para obtenção de RQ em função da taxa metabólica.

A taxa de produção de  $\text{CO}_2$  de uma pessoa é dada pela seguinte relação multiplicativa da taxa de consumo de oxigénio com o quociente respiratório, conforme a equação (3.3).

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{O}_2} \times \text{RQ} \quad (3.3)$$

Através da (3.2), determinou-se a área de superfície do ocupante de pé em cerca de 1.796  $\text{m}^2$ , para uma taxa de metabolismo conforme a Tabela 3.3 centrada entre escrever e andar de aproximadamente 1.6 met, e um valor de RQ correspondente da Figura 3.7 de 0.855. Através de (3.3) determinou-se a taxa de produção de  $\text{CO}_2$  obtendo-se um valor de 24.506  $\text{ICO}_2/\text{h}$ .

Relativamente aos ocupantes sentados, considerou-se a mesma metodologia de cálculo prevista anteriormente, integrando uma área de superfície de cada ocupante sentado de cerca de 1.555  $\text{m}^2$ , um metabolismo de 1.2 met em conformidade com a Tabela 3.3, e um RQ de 0.838 obtido por interpolação da equação de regressão linear da Figura 3.7. O valor da taxa de produção de  $\text{CO}_2$  resultante é de 15.985  $\text{ICO}_2/\text{h.pessoa}$ .

A Figura 3.8 representa a taxa de oxigénio consumida e a produção de  $\text{CO}_2$  em função do nível de actividade física para um adulto de estatura média com uma área de Dubois de 1.8  $\text{m}^2$  e um RQ de 0.83.

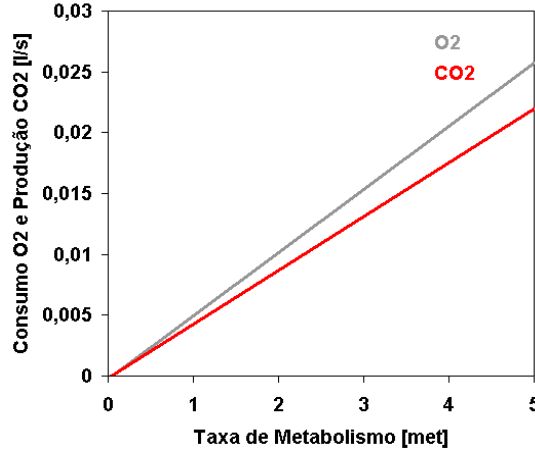


Figura 3.8: Produção de CO<sub>2</sub> e consumo de O<sub>2</sub> em função da taxa de metabolismo.

### *Determinação do volume de injeção de CO<sub>2</sub>*

Dado o carácter transiente do modelo em estudo, com um intervalo de tempo de 125 minutos, prevê-se que a concentração interior inicial de CO<sub>2</sub> seja igual à concentração exterior, com tendência crescente após ocupação derivado da geração da espécie referida. É mantida uma taxa de renovação de ar com dependência do quociente entre o caudal de ventilação e o volume da sala de aula. A concentração interior de CO<sub>2</sub> neste caso é determinada em regime transiente a partir da equação (3.4), com  $C_i(t)$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>ar] a representar a concentração de CO<sub>2</sub> no interior ao longo do tempo,  $C_e$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>ar] a representar a concentração de CO<sub>2</sub> no exterior,  $n$  [ren/h] a representar a taxa de renovação de ar por hora e  $t$  [h], a representar o tempo.

$$(C_{i(t)} - C_e) = (C_0 - C_e)e^{-nt} + \frac{G / V_{\text{espaço}}}{n}(1 - e^{-nt}) \quad (3.4)$$

A equação (3.4) descrita anteriormente permitiu analiticamente a determinação da concentração interior de CO<sub>2</sub> no intervalo de tempo limite de 125 minutos, pelo que é possível extrapolar a solução para todo o domínio de cálculo, considerando uma distribuição homogénea da concentração por toda a sala de aula. A geração do modelo no motor de cálculo permite obter um gradiente de concentração de CO<sub>2</sub> por todo o volume de controlo, focando picos de concentração máxima junto dos ocupantes. Desta forma torna-se complexo correlacionar a equação analítica com os valores obtidos da distribuição da concentração de CO<sub>2</sub>. Devemos assumir o ponto de calibração, quando o pico máximo de concentração de CO<sub>2</sub> atingido na zona de respiração ( $y \leq 2$  m) igualar o valor obtido na equação analítica. Desta forma o ponto de calibração é obtido com base numa evolução de concentração interior de CO<sub>2</sub>, através da iteração da injeção de caudal mássico e respectivo volume de controlo da

espécie  $\text{CO}_2$ , para uma taxa de renovação de ar de  $30 \text{ m}^3/\text{h.pessoa}$ , considerando o método de ventilação por mistura. O método de ventilação de mistura é seleccionado para a calibração do modelo, dada a sua capacidade de promover uma homogeneização da concentração de  $\text{CO}_2$  pelo volume do espaço, conforme justificado no Capítulo 1 na secção Métodos de Ventilação. Contrariamente ao método por deslocamento que promove a estratificação da concentração de  $\text{CO}_2$ , o método de mistura corresponde de forma aproximada ao valor obtido da equação analítica de diluição (3.4), validando desta forma a calibração do modelo para os restantes métodos de ventilação e optimizações necessárias para melhoria da concentração de  $\text{CO}_2$ .

A Figura 3.9 representa a geometria criada no motor de cálculo para simular uma ocupação de sete pessoas (um ocupante de pé com uma actividade física entre escrever e andar, interpolado num metabolismo de 1.6 met, e seis ocupantes sentados com uma actividade física de escrever com um metabolismo de 1.2 met), integrando as fontes de concentração de  $\text{CO}_2$ . O volume de geração de  $\text{CO}_2$  encontra-se espacialmente localizado na zona de interacção do processo respiratório (condições de fronteira delimitadas entre o tronco e o limite superior da cabeça), demarcado a verde. A introdução e exaustão de ar novo são efectuadas respectivamente através das grelhas referenciadas pelo n.º 1 e o n.º 2 na Figura 3.9.

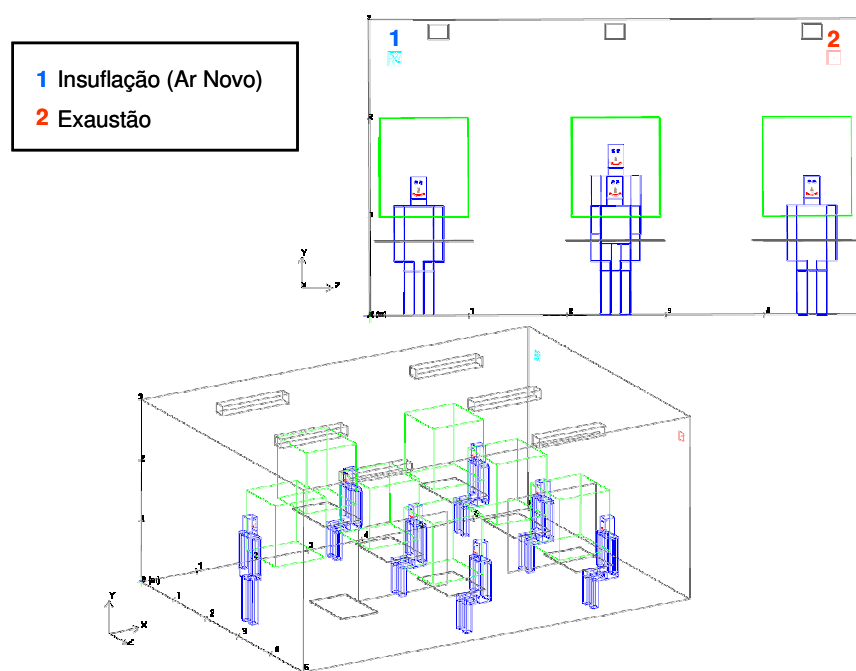


Figura 3.9: Pormenor dos elementos terminais de difusão de ar na calibração do modelo numérico.

A obtenção via analítica do resultado da concentração interior em regime transiente é conseguida através da consideração de uma condição inicial de concentração de  $\text{CO}_2$  interior igual à concentração exterior em cerca de 450 ppm (296 ppmv), uma renovação de ar com um

valor de 1.95 ren/h, uma geração de CO<sub>2</sub> para o ocupante de pé de 24.506 l/h.pessoa e para cada ocupante sentado cerca de 15.985 lCO<sub>2</sub>/h.pessoa, e por último um volume da sala de aula de 105 m<sup>3</sup>. A convergência do valor de concentração de CO<sub>2</sub> obtida no modelo numérico para o tempo de 125 minutos na Tabela 3.5 é conseguida através da iteração de um volume de concentração de CO<sub>2</sub> com as dimensões (LxAxP) de 0.9x1x0.9 [m] e um caudal mássico de injeção de 4.3x10<sup>-6</sup> kg/s para o ocupante de pé e 1x10<sup>-5</sup> kg/s para cada ocupante sentado, conforme apresentado na Tabela 3.6.

Desta forma fica demonstrada a validação dos valores numéricos com a equação analítica (3.4), através da verificação da convergência do valor numérico de concentração de CO<sub>2</sub> para o instante de tempo de 7500 segundos com uma margem de erro associada de 0.7%. Os valores da Tabela 3.6 serão considerados como constantes de entrada nas diversas simulações numéricas a efectuar.

Tabela 3.5: Valor comparativo de concentração de CO<sub>2</sub> obtido entre a equação de diluição e o FLUENT<sup>®</sup>.

Tempo		Concentração CO <sub>2</sub>	
Minutos	Segundos	Valor analítico [ppm]	Valor Numérico [ppm]
125	7500	1026.82	1019.16

Tabela 3.6: Volume de Injecção de CO<sub>2</sub> de acordo com actividade metabólica.

Dimensões do Volume de Controlo de Injecção de CO <sub>2</sub> (LxAxP) [m]		Caudal Mássico Injecção de CO <sub>2</sub> [kg/s]
Ocupante de Pé	0.9x1x0.9	4.3x10 <sup>-6</sup>
Ocupante Sentado	0.9x1x0.9	1x10 <sup>-5</sup>

### 3.3.2 Geração da malha

A malha consiste em elementos discretos localizados pelo domínio de cálculo, onde em cada elemento são resolvidas as equações de estado.

No procedimento de criação da malha, cada objecto do domínio de cálculo é “meshado” individualmente, no entanto junto aos mesmos, derivado dos gradientes de temperatura e velocidade e de forma a resolver a solução óptima, deve ocorrer uma maior refinação da

malha. Nos espaços mais abertos entre os objectos, a malha apresenta volumes de controlo de maior dimensão no sentido de minimizar o tempo de cálculo.

Entre as diferentes possibilidades de malhas (hexaedricas e tetraédricas), para geometrias complicadas com objectos esféricos ou elipsoidais, a malha tetraédrica produz uma qualidade de células superiores. No entanto os objectos do domínio de cálculo em estudo são geometricamente rectangulares ou lineares, pelo que a malha não estruturada hexaedrica é a malha mais apropriada. A malha tetraédrica deve ser utilizada apenas quando estamos perante uma malha com geometrias complexas onde a malha hexaedrica não é possível aplicar.

A malha utilizada no estudo (ex: método de mistura apresentado na Figura 3.10 e Figura 3.11) é não estruturada hexaedrica com um valor mínimo de distância de separação entre os objectos (grau de refinação da malha) associado a um factor de escala de 1/20 relativamente às dimensões da sala de aula, perfazendo respectivamente no eixo cartesiano x,y,z (0.35, 0.25,0.15) [m] e correspondendo a 688204 elementos e 722231 nós.

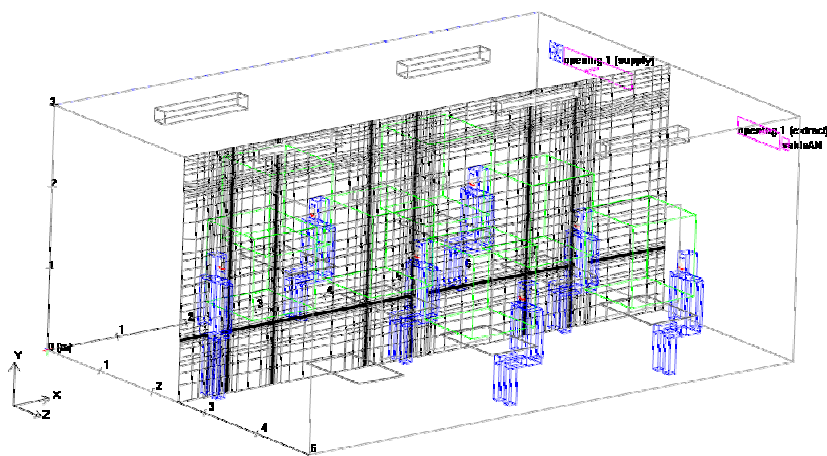


Figura 3.10: Integração 3D da malha hexaedrica no domínio de cálculo.



Figura 3.11: Integração no plano de corte XY da Malha hexaedrica no domínio de cálculo.



O valor de “Max O-grid height” especifica a distância entre a superfície do objecto e o início da malha, pelo que um valor relativamente baixo à dimensão do objecto, devolverá uma qualidade de malha superior na proximidade do mesmo. O valor definido é de 0.001m.

“ Element Count” é o número de divisões que a cada superfície do objecto do domínio de cálculo pode ser sujeito. Nas grelhas de insuflação de ar, o requisito de valor é 5, pelo que a malha nas condições de fronteira do objecto é mais refinada.

Por defeito os objectos são “meshados” pela ordem que foram criados. No caso de dois objectos, a malha será criada de acordo a prioridade do primeiro objecto, e o objecto com maior prioridade irá manter a malha quando intersectar um objecto com menor prioridade. Desta forma o resultado final poderá não ser o pretendido, pelo que poderá ser necessário alterar as prioridades do objecto. Os valores dos elementos envolventes que constituem a sala de aula têm valor zero de forma a não constituir prioridade na construção da malha.

A qualidade da malha num elemento hexaedrico é definida como um determinante da matriz Jacobiana, consistindo na medição dos elementos distorcidos. Os melhores elementos encontram-se geralmente com qualidade perto de 1 e elementos com valores inferiores a 0.15 são distorcidos. Conforme a Figura 3.12 todos os elementos apresentam uma qualidade próxima de 1, reforçando a decisão na escolha do tipo de malha e ajuste dos parâmetros de refinação da malha.

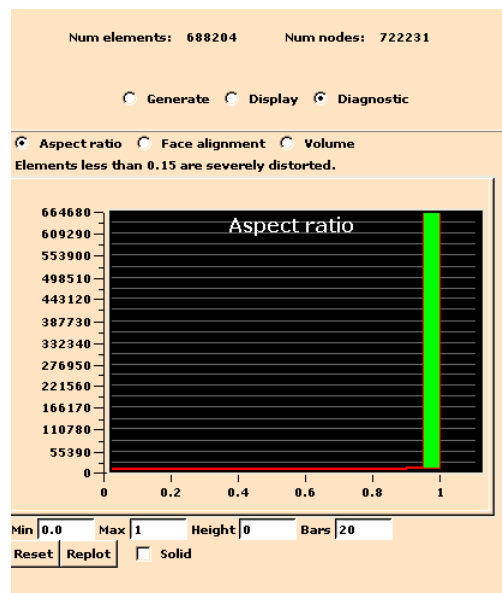


Figura 3.12: Análise da qualidade da malha hexaedrica.

O alinhamento das faces é uma outra medida da qualidade da malha, definida em (3.5).

$$\text{Índice alinhamento face} = c_o \vec{c}_1 \cdot \vec{f} \quad (3.5)$$

Onde  $c_0$  e  $c_1$  são os centros de massa dos dois elementos adjacentes e  $\vec{f}$  o vector normal à face entre os dois elementos. Caso as faces “meshadas” adjacentes não se encontrem alinhadas, os elementos irão ficar distorcidos (estreitos e compridos). Assim o valor de 1 indica um alinhamento perfeito e valores inferiores a 0.15 uma malha fortemente distorcida. A Figura 3.13 indica a não existência de distorção dos elementos, assegurando uma qualidade da malha excelente.

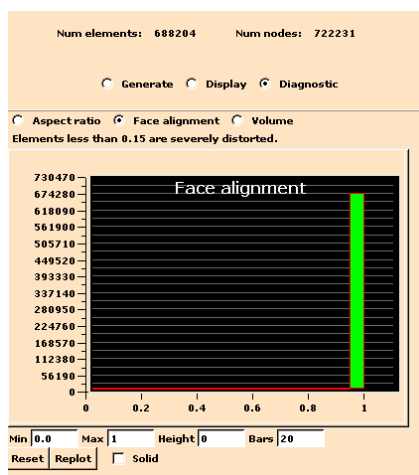


Figura 3.13: Análise da qualidade da malha hexaedrica pelo alinhamento das faces.

### 3.3.3 Solução

Após a construção do modelo e geração da malha é necessário calcular a solução. Tendo como base a informação recolhida na secção Técnicas de Discretização no Capítulo 2 aplicaram-se respectivamente as técnicas de “Body Force Weighted” e Upwind 1ª ordem para as grandezas pressão, momento, temperatura e CO<sub>2</sub>, resultando na obtenção de uma solução rápida e assertiva. Em conformidade com o capítulo 2, na secção Esquema Numérico, derivado da não linearidade das equações, é necessário reduzir a divergência do valor da variável em cada iteração através da introdução do factor de relaxação. O factor de relaxação por defeito para a pressão é de 0.3, para o momento 0.7, temperatura viscosidade e CO<sub>2</sub> cerca de 1. O factor de relaxação de 0.7 para o momento indica que a variação do seu valor na passagem de uma iteração para outra irá estar restrita a 70% da diferença entre o valor inicial e o novo valor calculado.

A adopção de um esquema multi-malha, conforme detalhado no Capítulo 2 Método Multi-Malha, permite acelerar a convergência da solução. A opção dos ciclos “V” ou “Flex” permite que as soluções sejam obtidas mais rapidamente utilizando uma sequência de malhas menos refinadas com base na malha computacional inicialmente criada. As soluções podem ser obtidas mais rapidamente numa malha menos refinada, no entanto com uma exactidão menor que uma malha refinada. São utilizados níveis de refinação na malha inicialmente definida para obter um ponto de partida para a solução final. Por defeito o ciclo “V” é utilizado para a

equação de pressão e o ciclo “Flex” para as restantes equações. Os critérios de terminação para o ciclo “Flex” determinam quando se deverá retornar a um nível de malha mais refinado (ex: Quando os valores residuais tiverem suficientemente melhorados no nível actual de cálculo). Para o ciclo “V”, o critério de terminação determina se outro ciclo deverá ser executado no nível de refinação original da malha. Caso o valor residual da malha mais refinada não cumprir os requisitos, será executado outro ciclo. Para o caso em concreto mantêm-se o valor de 0.1. O valor de tolerância de redução residual aplicado apenas ao ciclo “Flex”, determina quando um nível de malha menos refinado deverá ser visitado (derivado de uma divergência da solução no nível actual). Desta forma quanto maior o valor da tolerância de redução residual  $\beta$ , menos visitadas serão as malhas com menor refinação. Para o caso em concreto mantêm-se o valor de 0.1.

Como as equações de escoamento e transferência de calor são altamente não lineares, a sua resolução numérica apenas será possível através de um processo iterativo. A obtenção do número de equações é determinada através da equação (3.6) para um regime de variação temporal transiente num intervalo de 0 a 7500 segundos para cada 30 segundos/ passo na calibração e 600 segundos/ passo na simulação dos modelos, e para 20 iterações/ passo.

$$n.^{\circ} \text{ iterações} = \frac{\Delta t [\text{segundos}]}{\Delta s \left[ \frac{\text{segundos}}{\text{passo}} \right]} \cdot \Delta i \left[ \frac{\text{iteraões}}{\text{passo}} \right] \quad (3.6)$$

Caso as soluções residuais de escoamento, energia, turbulência e espécies (CO<sub>2</sub>) sejam menores ou iguais aos seus critérios de convergência, a solução admite-se convergida. Assumem-se os seguintes valores de convergência para o escoamento de 0.01 e energia de  $1 \times 10^{-6}$ .

### 3.4 Conclusões

Neste capítulo recorreu-se a utilização de um software comercial designado por DESIGN BUILDER<sup>®</sup> que permitiu a modelação dos parâmetros variáveis que influenciam o comportamento térmico de um modelo geométrico, caracterizado para este estudo como uma sala de aula. Os dados resultantes do cálculo de carga térmica permitem a parametrização de um novo modelo a integrar no software motor de cálculo FLUENT<sup>®</sup> para análise CFD. Para efectivar o balanço energético à sala de aula obteve-se como resultado do cálculo das cargas térmicas um caudal volúmico de 0.558 m<sup>3</sup>/s, contemplando o caudal de ar novo previsto anteriormente de cerca de 30 m<sup>3</sup>/h.ocup (perfazendo um caudal volúmico total para os sete ocupantes de 0.058 m<sup>3</sup>/s) e um caudal volúmico de recirculação por diferencial de 0.5 m<sup>3</sup>/s.

O modelo numérico para os diferentes métodos de ventilação é desenvolvido em regime transiente para um intervalo de tempo de 7500 segundos, com injeção de uma fonte de

espécie ( $\text{CO}_2$ ) por ocupante e simulação de um sistema de climatização com introdução de ar novo com recuperação térmica e recirculação de ar interior.

Na calibração do modelo numérico mediante o recurso à equação de diluição, considerou-se a sala de aula com uma concentração inicial igual à concentração exterior, com geração de espécie  $\text{CO}_2$  por cada ocupante e uma taxa de renovação definida no RSECE [3] para o tipo de aplicação. Em conformidade com o valor obtido da equação de diluição em aproximadamente 1026 ppm face ao resultado numérico demarcado com um pico de concentração de  $\text{CO}_2$  máximo de 1019 ppm, verifica-se uma margem de erro de cerca de 0.7 %, validando a rotina de cálculo em análise e garantindo a calibração do modelo para as restantes rotinas a calcular.

## 4 Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados da calibração do modelo numérico e das rotinas de cálculo ao nível da distribuição da concentração de CO<sub>2</sub>, idade média do ar e trajectória de partículas, distribuição da temperatura e velocidade do ar, índice de voto médio previsível (índice PMV) e percentagem de pessoas insatisfeitas (Índice PPD) para os métodos de ventilação adoptados. Previu-se para as rotinas de cálculo associadas a cada um dos métodos de ventilação, a alteração do ângulo de insuflação das grelhas prevendo a melhoria, caso possível, da distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> para valores regulamentares, e a introdução de novos valores de caudal de ar novo. Pretende-se igualmente aferir o valor de eficácia de ventilação e comparar com os valores recomendados da prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [13].

O campo de distribuição de concentração de CO<sub>2</sub> aparece representado sob a forma de fracção mássica da espécie na mistura. Ao seu valor deverá ser aplicado um factor multiplicativo de  $1 \times 10^6$  de forma a corresponder à unidade prevista [ppm].

### 4.1 Calibração do modelo geométrico

Nesta secção apresentam-se os resultados da distribuição de CO<sub>2</sub> relativamente ao caso isolado do estudo de calibração do modelo numérico, em conformidade com a equação analítica (3.4).

A Figura 4.1 apresenta a convergência das soluções de cálculo, demonstrando os limites dos valores residuais inferiores aos critérios de convergência definidos no Capítulo 3, na secção Solução.

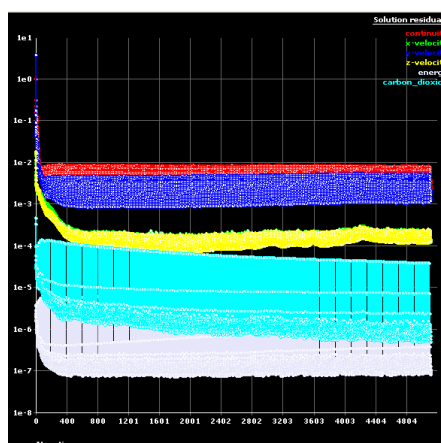


Figura 4.1: Convergência da solução de cálculo da calibração do modelo numérico.

A Figura 4.2 demonstra para um regime transiente, no instante de 7500 segundos ou 125 minutos, o gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$  no plano de corte XZ, com y a adquirir o valor de 1.692 m (valor máximo de concentração de  $\text{CO}_2$  atingido na zona de respiração com  $0 < y < 2 \text{ [m]}$ ), e no plano de corte YZ com x a adquirir os valores de 1.2 e 5 metros. Registam-se os diversos picos máximos de concentração de  $\text{CO}_2$  em cerca de 1019 ppm, validando a calibração do modelo e permitindo o recurso dos valores iterados e otimizados na Tabela 3.6 para as restantes rotinas de cálculo.

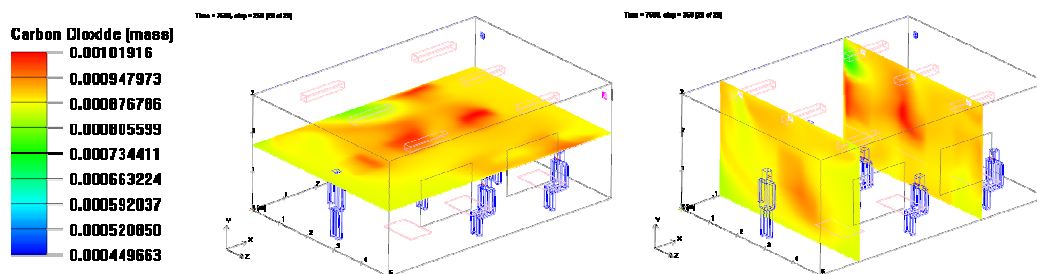


Figura 4.2: Gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$  nos planos de cortes com  $y=1.692 \text{ m}$ ,  $x=1.2$  e  $x=5\text{m}$ .

Na Figura 4.3 apresentam-se os diferentes planos de corte YZ para a zona do ocupante de pé, 1ª fila e 2ª fila dos ocupantes sentados, respectivamente com x a adquirir o valor de 1.2, 2.5 e 5 m. A zona central evidencia a maior concentração de  $\text{CO}_2$  devido a baixas velocidades e criação de vórtices devido à recirculação do ar, mantendo-se nas zonas de insuflação e retorno, níveis de  $\text{CO}_2$  bastante mais reduzidos.

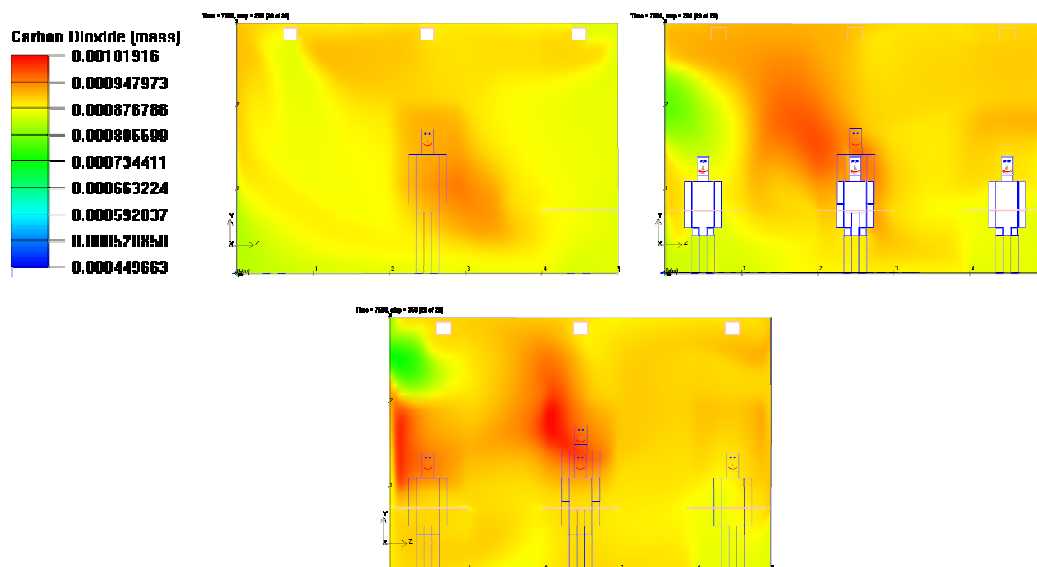


Figura 4.3: Gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$  no plano de corte YZ para a fila de ocupante de pé, 1ª e 2ª fila de ocupantes sentados.

A Figura 4.4 revela os planos de corte XY para a zona de insuflação, central e retorno, respectivamente com  $z$  a adquirir os valores de 0.2, 2.5 e 4.8 m, prevendo-se uma redução da concentração de  $\text{CO}_2$  na zona de insuflação através da introdução de ar novo exterior (450 ppm).

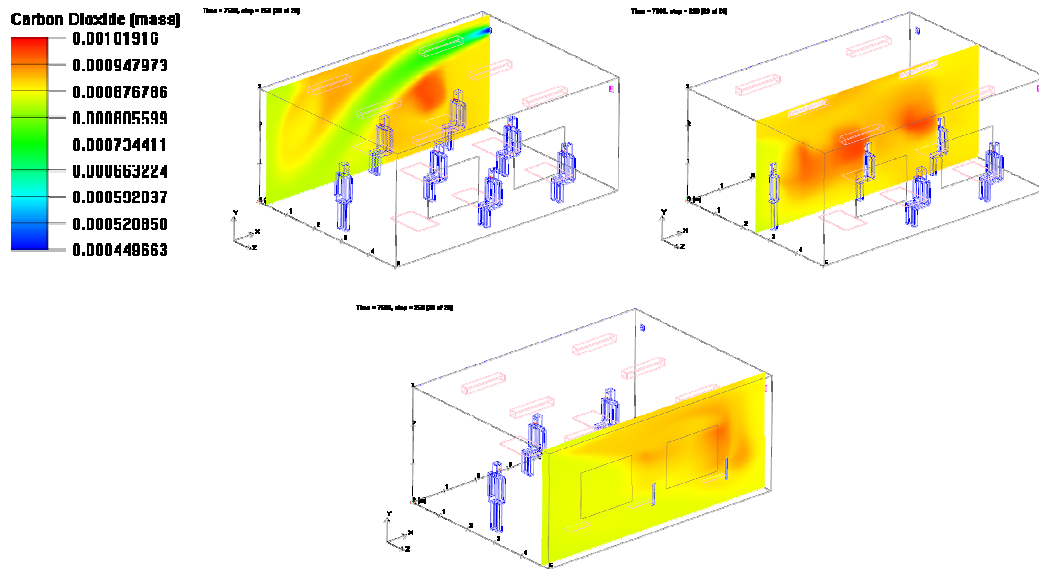


Figura 4.4: Gradiente de concentração de  $\text{CO}_2$  no plano de corte XY para  $z=0.2, 2.5, 4.8$  m.

## 4.2 Análise de métodos de ventilação em CFD

Esta secção compreende a análise do modelo numérico em estudo no modo de arrefecimento, simulando os diversos métodos de ventilação por diluição de  $\text{CO}_2$  (Método de Mistura, Método Cruzado e Método por Deslocamento). A análise do campo espacial de concentração de  $\text{CO}_2$  na zona de respiração, zona de insuflação e zona de extracção permite decifrar os locais de maior tempo de residência da espécie. Desta forma adaptam-se métodos adicionais de melhoria efectiva como a alteração do ângulo de ataque das grelhas de insuflação e o agravamento no caudal de ar novo, validando para as geometrias em estudo a adopção dos valores de eficácia de ventilação quer da prENV1752:1997 [13], quer da ASHRAE 62.1:2004 [9]. Apresentam-se igualmente nesta secção os resultados dos diversos métodos de ventilação ao nível do campo de contorno de temperatura do ar, campo vectorial e contorno de velocidade do ar, campo de idade média e trajectória de partículas do ar, e campo de índice de conforto térmico e assimetrias verticais dos parâmetros de estudo em pontos de medição localizados.

No desenvolvimento das rotinas de cálculo para os diversos métodos de ventilação, assumiram-se os seguintes critérios [62]: “As medições *devem ser efectuadas na zona ocupada do espaço, definida de acordo com norma europeia EN13779*”. Os pontos de medida *não devem estar a menos de 1 metro das fontes de contaminação e todas as medições devem*

*ser feitas ao nível das vias respiratórias, nos pontos que se julguem mais desfavoráveis para o parâmetro em causa*”. Nesse sentido obtiveram-se os campos de distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> num corte horizontal a uma altura de 1.692 m (valor máximo de concentração de CO<sub>2</sub> atingido na zona de respiração com  $0 < y < 2$  [m]), sendo o valor máximo de concentração de CO<sub>2</sub> a pelo menos 1 metro da fonte de geração de poluentes (ocupantes).

De forma a prever a redução da concentração de CO<sub>2</sub> estudaram-se potenciais métodos de melhoria da concentração de CO<sub>2</sub> como a correcção dos ângulos de insuflação para o método de mistura e cruzado e o incremento da quantidade de ar novo para melhoria da eficácia de ventilação ao nível do método de mistura, cruzado e deslocamento.

Para uma análise das condições paramétricas de estudo no local onde os ocupantes se encontram, consideraram-se os pontos de medição definidos nas coordenadas cartesianas apresentadas na Figura 4.5 e enunciadas na Tabela 4.1, em conformidade com a metodologia adoptada [62]. Desta forma pretende-se obter resultados de assimetrias verticais na zona de ocupação demarcada a azul pelo limite vertical compreendido entre ( $0 < Y < 2$  m), ao nível de concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura, velocidade e índice de PMV para os métodos de ventilação em estudo.

A sequência preconizada pela Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4 apresenta pela mesma ordem, os dados de entrada nas rotinas de cálculo para os elementos de difusão de ar das opções de Ventilação  $\alpha$ , Ventilação  $\beta$  e Ventilação  $\gamma$ , correspondendo respectivamente a uma ventilação normal, uma ventilação com correcção do ângulo de insuflação e uma ventilação normal com agravamento no caudal de ar novo, para cada um dos métodos de ventilação (mistura, cruzado e deslocamento).

Tabela 4.1: Coordenadas cartesianas dos pontos de medição para análise de valores de assimetria vertical.

Ponto de Medição	Coordenada Cartesianas (x,y) [metros]
1	(1.5 , 2.5)
2	(4 , 0.5)
3	(4 , 2.5)
4	(4 , 4.5)



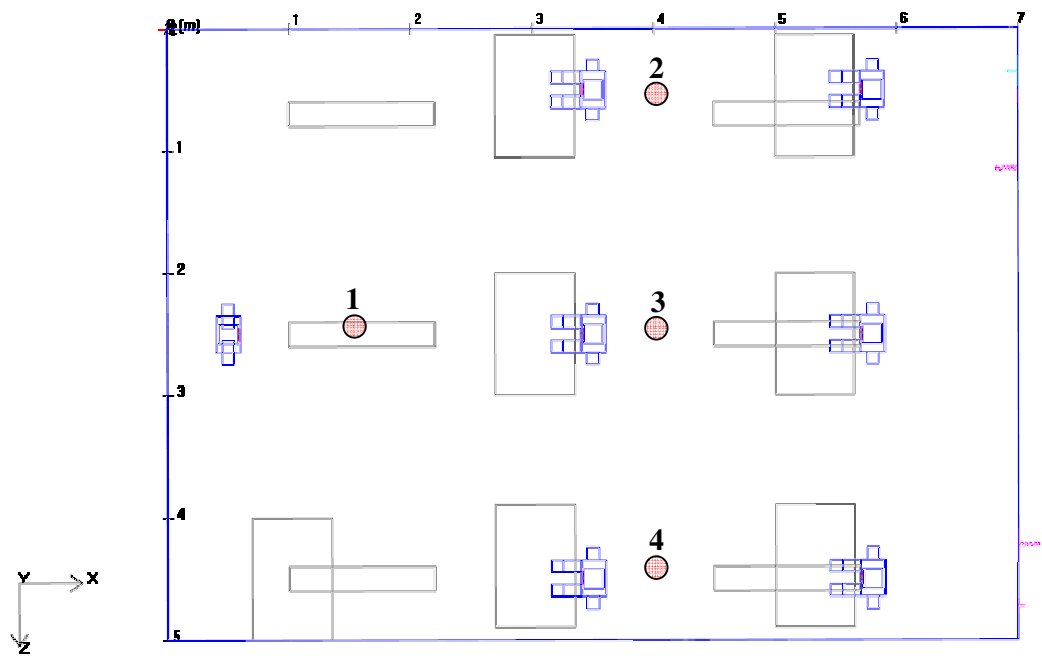


Figura 4.5: Localização dos pontos de medição de assimetrias verticais.

Tabela 4.2: Características dos elementos de difusão de ar no método de ventilação  $\alpha$ .

Localização Grelhas	Insuflação Ar Novo				Extracção Ar Novo		Recirculação Insuflação			Recirculação Retorno		
Método Ventilação	$q_v$ [m <sup>3</sup> /s]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	T [°C]	[CO <sub>2</sub> ] Exterior [ppmv]	v [m/s]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Dimensões Grelha (AxL) [m]
Mistura	0.058	0.2x0.25	16	296	3.5	0.135x0.135	0.6	-2	0.2x1.3	0.6	-2	0.2x0.8
Cruzado	0.058	0.2x0.25	16	296	3.5	0.135x0.135	0.6	-2	0.2x1.3	0.6	-2	0.2x0.8
Deslocamento	0.029 <sup>1</sup>	0.17x0.5 <sup>1</sup>	22 <sup>1</sup>	296 <sup>1</sup>	3.5 <sup>1</sup>	0.2x0.09	0.3 <sup>1</sup>	-2 <sup>1</sup>	1.5x0.5 <sup>1</sup>	0.3 <sup>1</sup>	-2 <sup>1</sup>	0.2X0.35 <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Duplicação dos elementos terminais de difusão de ar para repartição do caudal mássico de ar.

Tabela 4.3: Características dos elementos de difusão de ar no método de ventilação  $\beta$  (ângulo  $\theta=63.43^\circ$ ).

Localização Grelhas	Insuflação Ar Novo				Extracção Ar Novo		Recirculação Insuflação			Recirculação Retorno		
Método Ventilação	$q_v$ [m <sup>3</sup> /s]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	T [°C]	[CO <sub>2</sub> ] Exterior [ppmv]	v [m/s]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Dimensões Grelha (AxL) [m]
Mistura	0.058	0.2x0.25	16	296	3.5	0.135x0.135	0.6	-2	0.2x1.3	0.6	-2	0.2x0.8
Cruzado	0.058	0.2x0.25	16	296	3.5	0.135x0.135	0.6	-2	0.2x1.3	0.6	-2	0.2x0.8

Tabela 4.4: Características dos elementos de difusão de ar no método de ventilação  $\gamma$ .

Localização Grelhas	Insuflação Ar Novo				Extracção Ar Novo		Recirculação Insuflação			Recirculação Retorno		
Método Ventilação	$q_v$ [m <sup>3</sup> /s]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	T [°C]	[CO <sub>2</sub> ] Exterior [ppmv]	v [m/s]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Dimensões Grelha (AxL) [m]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\Delta T$ [°C]	Dimensões Grelha (AxL) [m]
Mistura	0.063	0.2x0.25	16	296	3.5	0.135x0.135	0.6	-2	0.2x1.3	0.6	-2	0.2x0.8
Cruzado	0.063	0.2x0.25	16	296	3.5	0.135x0.135	0.6	-2	0.2x1.3	0.6	-2	0.2x0.8
Deslocamento	0.058 <sup>2</sup>	0.31x0.5 <sup>2</sup>	22 <sup>2</sup>	296 <sup>2</sup>	3.5	0.2x0.16	0.3 <sup>2</sup>	-2 <sup>2</sup>	1.5x0.5 <sup>2</sup>	0.3 <sup>2</sup>	-2 <sup>2</sup>	0.2X0.35 <sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Duplicação dos elementos terminais de difusão de ar para repartição do caudal mássico de ar.

### *Campo de distribuição de concentração de CO<sub>2</sub>*

Com o objectivo de apresentar os resultados da variação de concentração de CO<sub>2</sub> ao fim de 7200 segundos, foram seleccionados diferentes planos de corte: O plano XZ a uma altura  $y$  com o valor de 1.692 m e o plano de corte XY para a zona ocupada com  $z$  a atingir 2.5 m. Na análise com  $z$  a atingir 2.5 m, os objectos que integram o domínio de cálculo adquirem prioridades na criação da malha, pelo que o resultado obtido pode não corresponder ao pretendido, sendo necessário proceder-se à análise dos planos de corte com  $z$  a atingir o valor de 3.07m para validação dos valores em análise.

Apresentam-se de seguida para respectivamente o método mistura, cruzado e deslocamento na opção ventilação  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , a distribuição espacial da concentração de CO<sub>2</sub> e assimetrias verticais nos pontos de medição definidos na Figura 4.5.

#### ***Ventilação $\alpha$ (plano XZ)***

A análise da Figura 4.6 permite a identificação imediata de focos de concentração de CO<sub>2</sub> associados à proximidade de geração de espécies. Demarca-se no método de mistura e cruzado uma concentração de CO<sub>2</sub> inferior na proximidade do ocupante de pé, promovido pela insuflação de ar novo da grelha e decaimento do ar junto da parede frontal. Verifica-se igualmente no método cruzado uma gama de concentração de CO<sub>2</sub> superior face ao método de mistura, promovido por uma trajectória desfavorável à zona de ocupação, ocorrendo o denominado curto de circuito sem varrimento na zona ocupada.

O método de deslocamento assegura uma melhor estratificação da concentração de CO<sub>2</sub>, derivado de um varrimento efectivo por todo o volume da sala de aula, no entanto embora seja o método que apresenta o valor de pico de concentração mais elevado em cerca de 1174 ppm, em valor médio é o método que apresenta o menor concentração de CO<sub>2</sub> na zona ocupada. O método mistura embora apresente um número de focos de concentração de CO<sub>2</sub> superiores ao método cruzado, em valor absoluto apresenta um nível de concentração máximo inferior (cerca de 1034 ppm), considerando-se contudo um método preferencial. Todos os métodos ultrapassam o valor regulamentar máximo de 1000 ppm definido no RSECE [3], sendo necessário adoptar outro método de ventilação de forma a prever uma redução do nível de concentração de CO<sub>2</sub>.

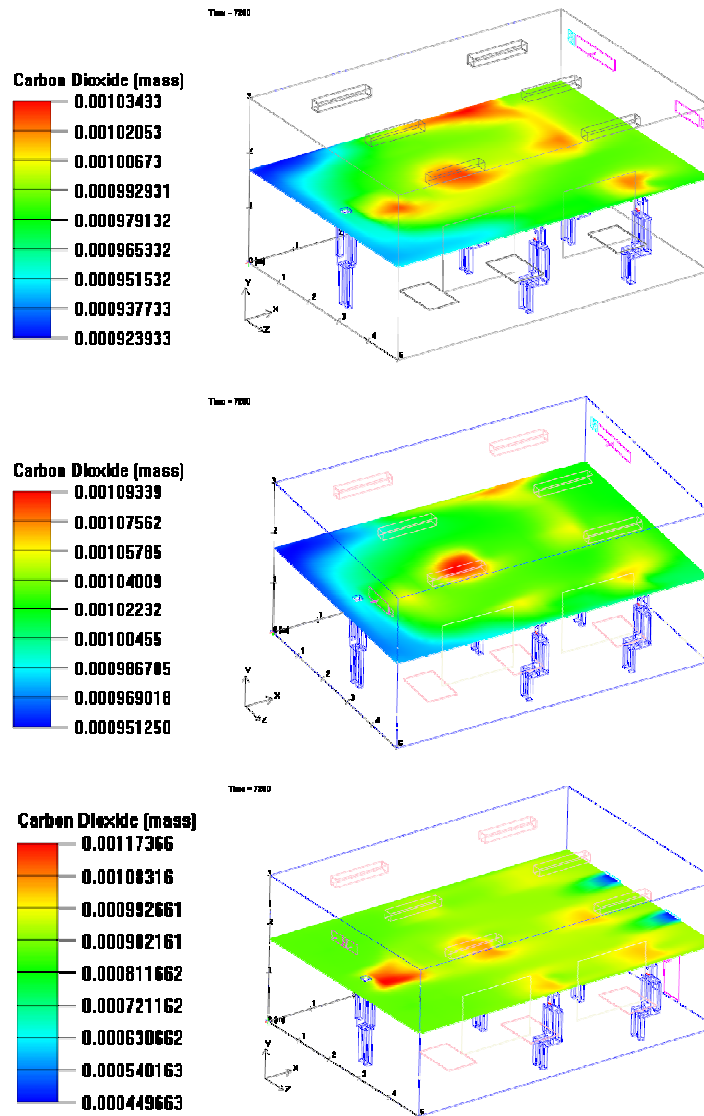


Figura 4.6: Distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> do tipo de ventilação  $\alpha$  para o método mistura, cruzado e deslocamento no plano de corte XZ.

### Ventilação $\beta$ (plano XZ)

O método de ventilação  $\beta$ , surge no intuito de melhorar a concentração máxima atingida no método  $\alpha$ , consistindo numa optimização do ângulo de ataque na grelha de insuflação para um valor  $\theta$  de 63.64°, conforme a Figura 4.7. A Figura 4.8 mostra uma redução clara dos focos e do nível de concentração de CO<sub>2</sub> devido a uma insuflação aproximada aos ocupantes e uma consequente diluição, no entanto incapaz de produzir resultados suficientemente satisfatórios no cumprimento do valor máximo regulamentar de 1000 ppm. A Tabela 4.5 representa os valores máximos de concentração atingidos no espaço em consonância com o método  $\alpha$  obtido da Figura 4.6, comparativamente aos novos valores obtidos pela optimização do ângulo da grelha de insuflação da Figura 4.8. A adopção de uma ventilação  $\beta$  revela para o método de

mistura uma diminuição da qualidade de ar, com um aumento ligeiro da concentração de  $\text{CO}_2$ , derivado de uma alteração da trajectória de insuflação para área da grelha de retorno e exaustão, prejudicando o varrimento efectivo de caudal volúmico no espaço. O método cruzado demonstra uma melhoria significativa na redução da gama de concentrações de  $\text{CO}_2$  derivado de uma projecção do caudal volúmico para a zona ocupada, promovendo um varrimento efectivo do caudal por toda a zona ocupada.

Dado o método de ventilação  $\beta$  por si só não ser capaz de cumprir os requisitos regulamentares máximos de concentração de  $\text{CO}_2$ , não se considera como método suficientemente sustentado para a continuidade do seu estudo.

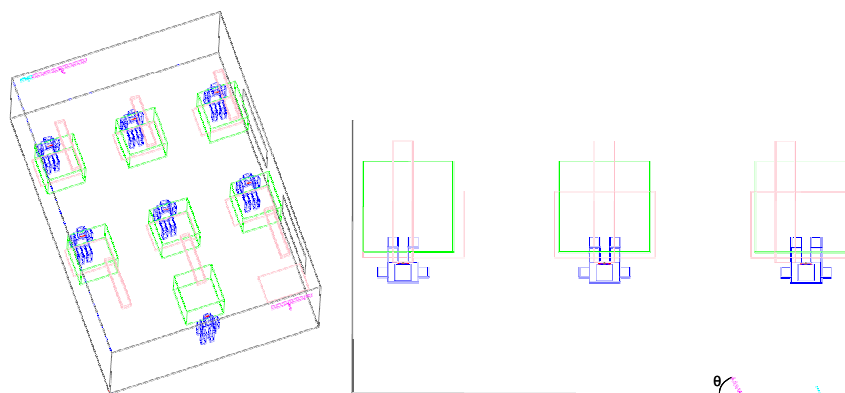


Figura 4.7: Pormenor da grelha com um ângulo de insuflação ( $\theta=63.43^\circ$ )

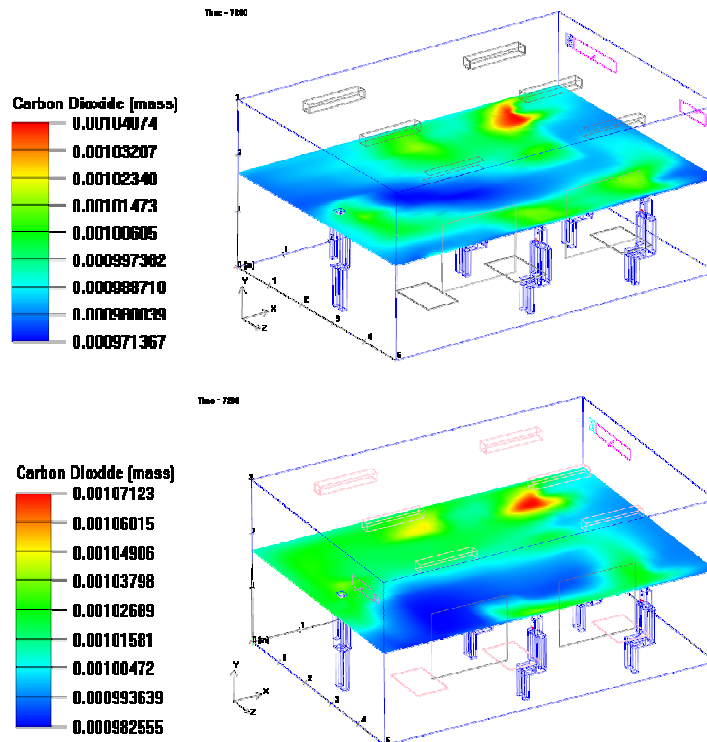


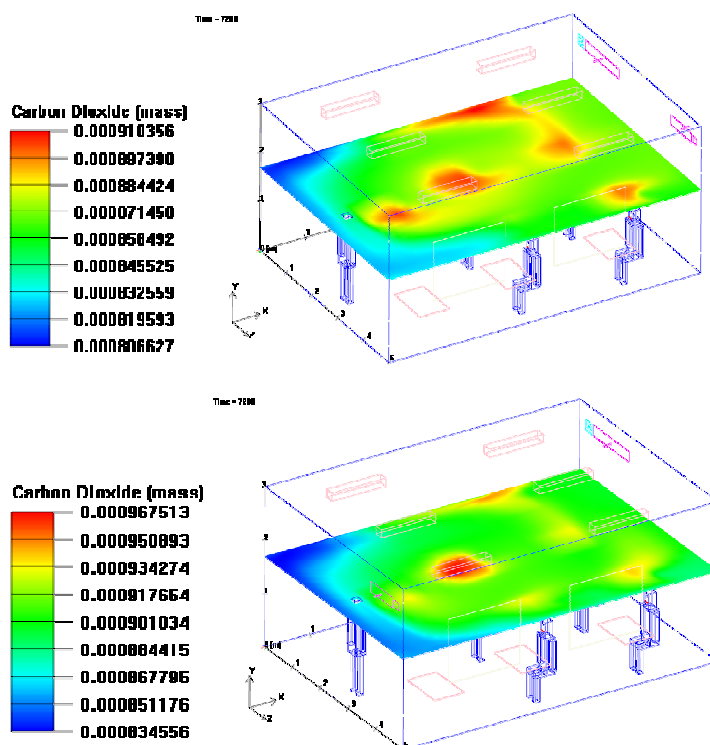
Figura 4.8: Distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  do tipo de ventilação  $\beta$  para o método mistura e cruzado no plano de corte XZ.

Tabela 4.5: Diferença de concentrações de CO<sub>2</sub> na otimização do ângulo de insuflação da grelha.

Método de Ventilação	Ventilação $\alpha$ [ppm]	Ventilação $\beta$ [ppm]	$\Delta\text{CO}_2$ [ppm]
Mistura	1034	1040	6
Cruzado	1093	1071	-22

### Ventilação $\gamma$ (Plano XZ)

O método previsto pela ventilação  $\gamma$ , contempla o valor adicional de ar novo a introduzir na zona climatizada de forma a reduzir o valor máximo de concentração de CO<sub>2</sub> para o valor regulamentar de 1000 ppm. Considerou-se para o método de mistura e cruzado um valor de eficácia de ventilação de 0.9 e para o método de deslocamento o valor de 0.5, verificando-se através da Figura 4.9, o cumprimento da concentração de CO<sub>2</sub> respectivamente para o método mistura, cruzado e deslocamento em cerca de 910 ppm, 967 ppm e 999 ppm.





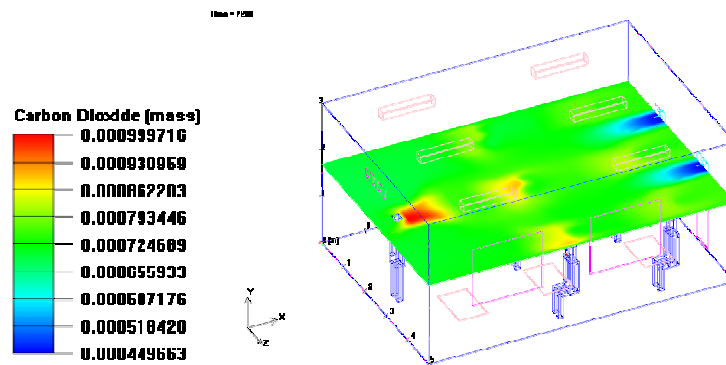


Figura 4.9: Distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura, cruzado e deslocamento no plano de corte XZ.

### ***Ventilação $\alpha$ (plano XY)***

Nesta secção pretende-se efectuar uma análise ao gradiente de concentração de CO<sub>2</sub> no plano de corte XY com z a adquirir o valor de 2.5m e para correcção devido à prioridade de malhas no mesmo plano, com z a adquirir o valor de 3.07 m, correspondendo respectivamente à fila central.

A Figura 4.10 e Figura 4.11 demonstram no plano de corte, uma concentração muito reduzida na zona frontal oposta à insuflação, derivado do decaimento do ar de insuflação.

Verifica-se no método cruzado, face ao método de mistura, focos de concentração de CO<sub>2</sub> na zona ocupada com um valor mais elevado, surtindo o efeito de uma diluição menos acentuada. Este fenómeno deriva essencialmente do curto-circuito promovido pela insuflação orientada directamente para a exaustão, permanecendo a zona ocupada com elevados picos de concentração.

O método de deslocamento expresso na Figura 4.12 apresenta uma distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> heterogénea, com a insuflação de ar novo na zona de ocupação e o retorno e exaustão na zona não ocupada, verificando-se uma estratificação acentuada da concentração de CO<sub>2</sub> em altura.

O método de deslocamento é o único método que verifica na zona ocupada o menor valor de concentração de CO<sub>2</sub> para o cumprimento do valor regulamentar, no entanto é o que apresenta, embora apenas no ocupante de pé, o maior pico de concentração em cerca de 1127 ppm.

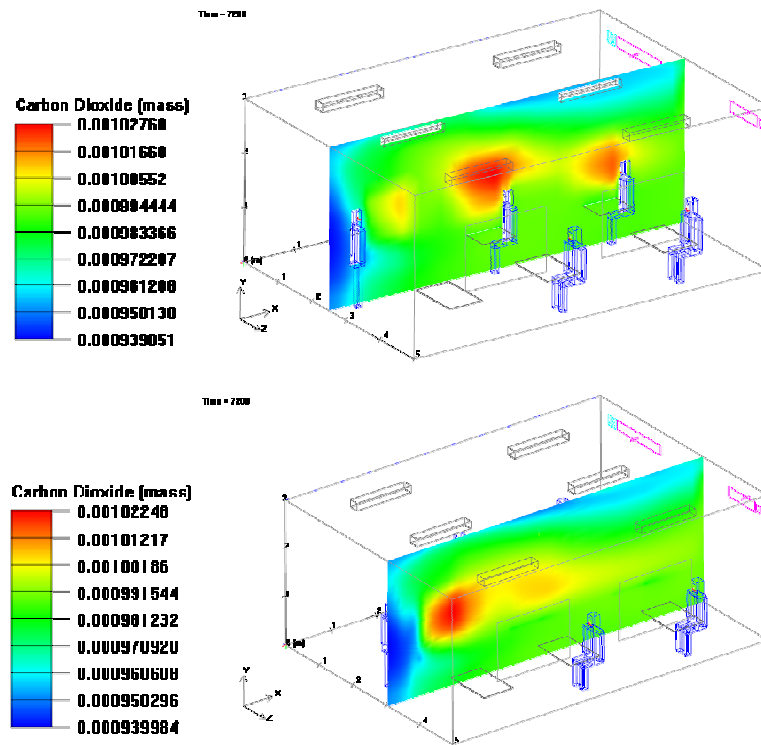


Figura 4.10: Distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  do tipo de ventilação  $\alpha$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

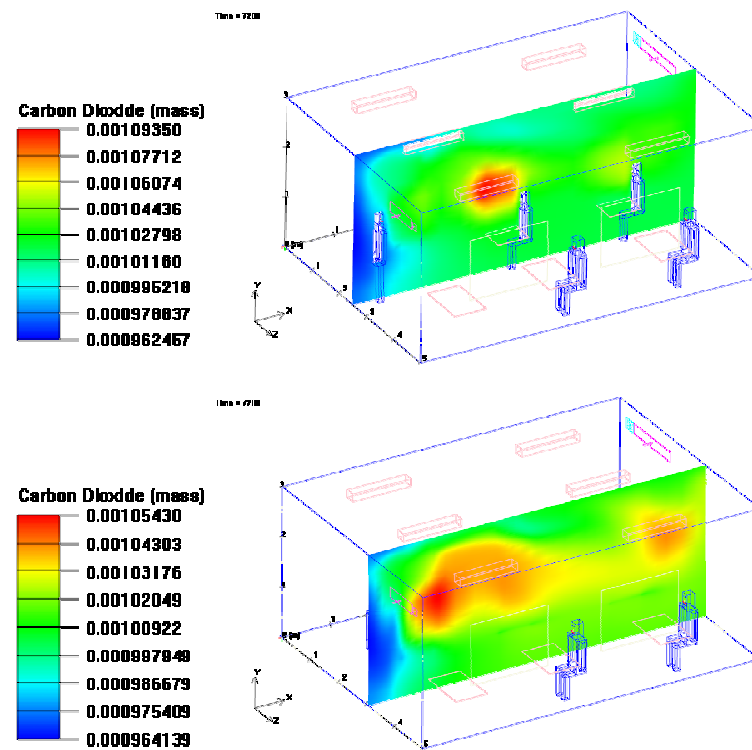


Figura 4.11: Distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  do tipo de ventilação  $\alpha$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

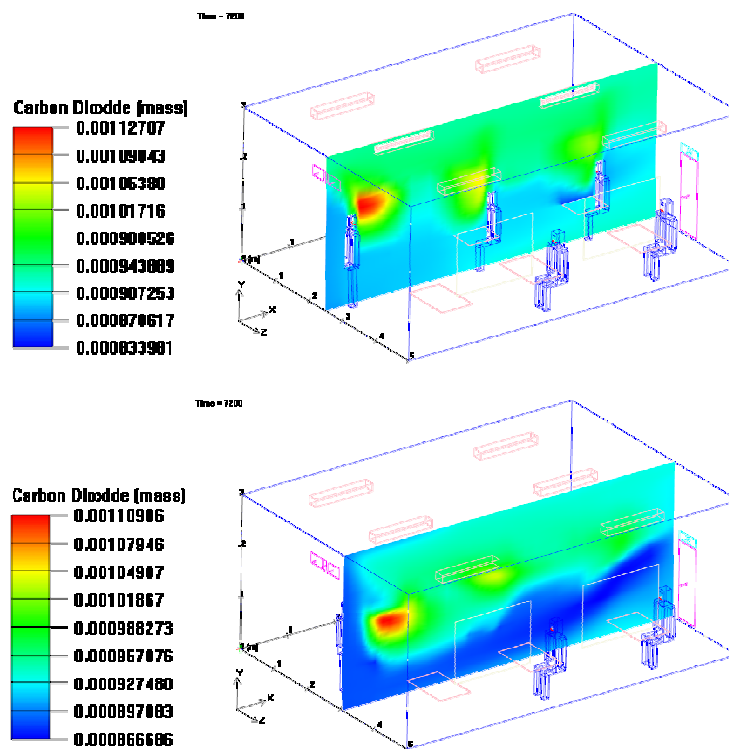
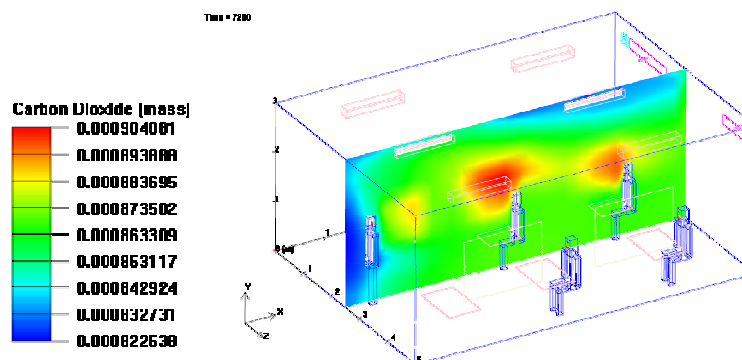


Figura 4.12: Distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> do tipo de ventilação  $\alpha$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

### Ventilação $\gamma$ (plano XY)

À semelhança da secção anteriormente abordada, pretende-se igualmente efectuar uma análise ao gradiente de concentrações no plano de corte XY com  $z$  a adquirir o valor de 2.5m e para correcção devido à prioridade de malhas com  $z$  a adquirir o valor de 3.07, correspondendo respectivamente à fila central. Verifica-se contudo mediante as Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, uma análise semelhante à obtida para a ventilação  $\alpha$ , com a particularidade do aumento do caudal de ar novo de forma a cumprir os valores regulamentares para valores inferiores a 1000 ppm.



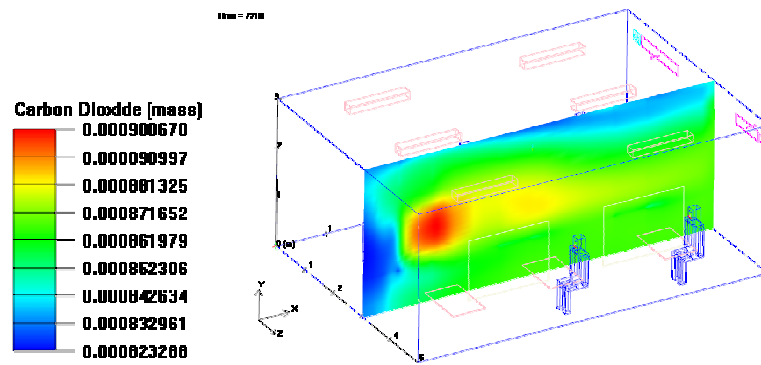


Figura 4.13: Distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

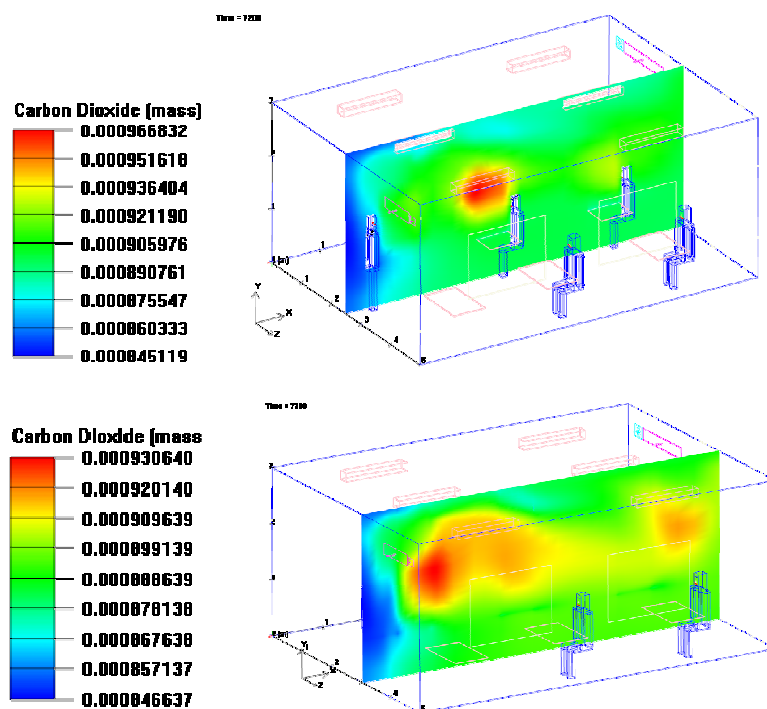


Figura 4.14: Distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

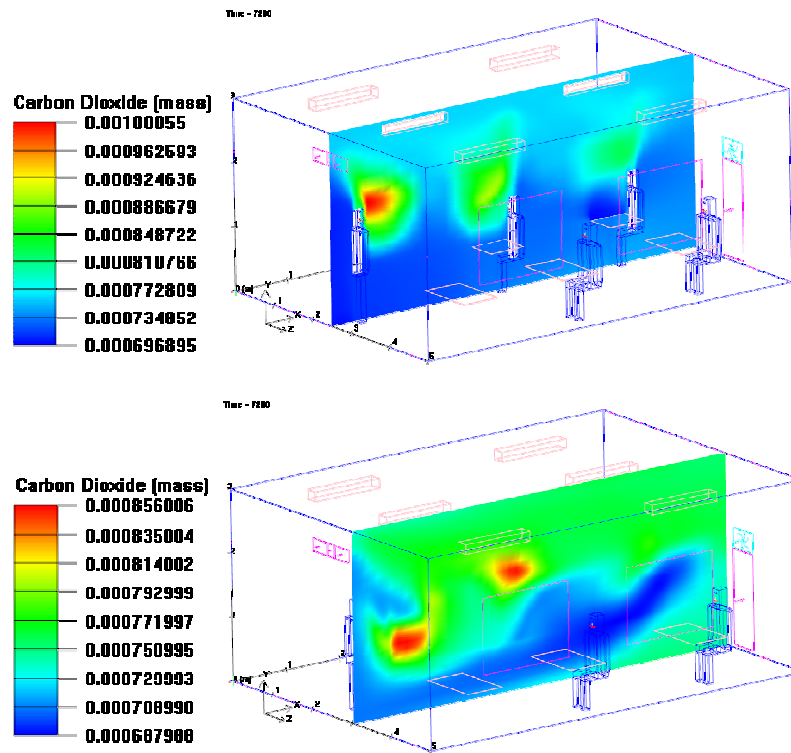


Figura 4.15: Distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

### ***Assimetria vertical $\alpha$***

Procede-se à apresentação dos gráficos de variação de concentração de CO<sub>2</sub> para o método de mistura, cruzado e deslocamento, nos pontos de medição definidos na Tabela 4.1, a cerca de 1.3 metros de distância dos ocupantes de pé conforme [62], podendo ser visualizados na Figura 4.5.

Verifica-se através da Figura 4.16 para o método de mistura uma evolução de concentração de CO<sub>2</sub> aproximadamente constante ao longo da altura do ocupante até 2 metros, padronizando uma homogeneização da concentração por toda a altura de medição e indiciando um consequente valor de eficácia de ventilação ligeiramente próximo de 1. Desta forma é minimizado o agravamento do caudal de ar novo para o cumprimento regulamentar. A zona central verifica o valor de concentração de CO<sub>2</sub> mais elevado, derivado de uma baixa velocidade do ar e alguma vorticidade que promovem um efeito de estagnação do ar mais acentuado.

O método cruzado expresso na Figura 4.17, representa um perfil vertical de concentração de CO<sub>2</sub> aproximadamente idêntico ao previsto no método de mistura, contudo com um valor de concentração absoluto superior, derivado essencialmente do denominado “curto-circuito” de ar promovido por uma insuflação de ar directamente para a zona de proximidade da grelha de retorno, ocorrendo por consequência um aumento da concentração na zona ocupada.

Verifica-se quer no método mistura, quer no cruzado (Ventilação  $\alpha$  lateral) um nível de concentração mais elevado no ocupante Ocup2 comparativamente ao Ocup4, devido à essencialmente à sua permanência por baixo do fluxo de ar novo. O caudal insuflado é posteriormente deflectido na parede frontal e redireccionado para outros pontos de medição, reduzindo o nível de concentração de CO<sub>2</sub>.

Relativamente ao método de deslocamento, verifica-se na Figura 4.18 o cumprimento regulamentar praticamente em toda a altura de medição, denunciando a estratificação do ar por camadas de concentração, com um valor ligeiramente superior perto dos 1.8 m na zona central. As zonas laterais cumprem praticamente os critérios regulamentares de concentração de CO<sub>2</sub>.

A redução acentuada da concentração de CO<sub>2</sub> a partir dos 2 metros de altura no local do ocupante sentado (Ocup2) na Figura 4.16 e Figura 4.17 (Gráfico ventilação  $\alpha$  lateral), prende-se com a aproximação em altura ao fluxo de insuflação de ar novo que se encontra acima dessa zona. Destaca-se contudo a existência de um ponto de inflexão a partir da altura de 2.8 metros, derivado do afastamento do fluxo de ar novo do tecto por decaimento associado à redução de velocidade e do diferencial de massa específica face ao meio de difusão. Encontra-se igualmente ligado, o fenómeno da velocidade zero da superfície do tecto, com uma evolução dependente do grau de refinação da malha.

Verifica-se na Figura 4.18 (Gráfico ventilação  $\alpha$  central), o ponto de inflexão de concentração de CO<sub>2</sub> aproximadamente a 1.7 metros de altura, correspondendo exactamente ao pico da fonte de geração de CO<sub>2</sub> na zona de respiração, pelo que se torna proeminente derivado do baixo momento criado pelas baixas velocidades. Estes fenómenos são repetidos igualmente na secção de Assimetria vertical  $\gamma$ .

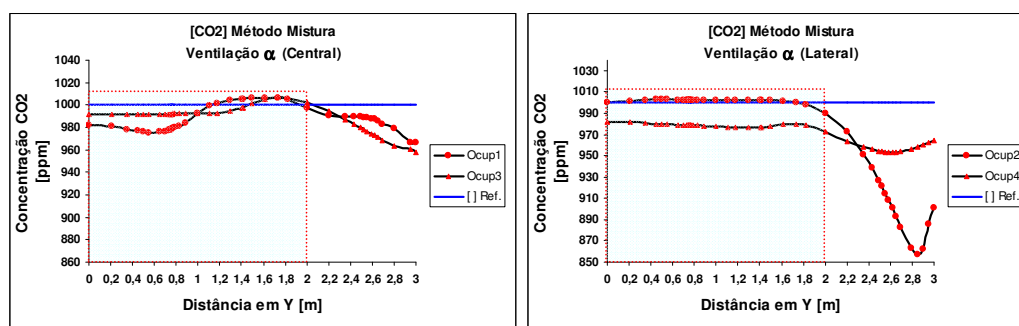


Figura 4.16: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\alpha$ .

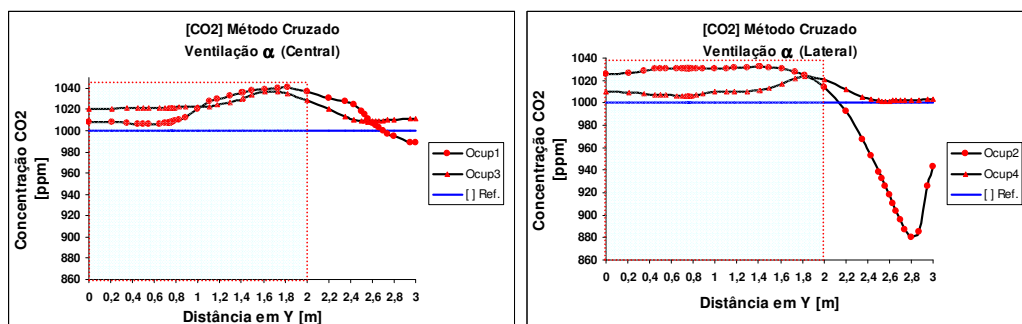


Figura 4.17: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\alpha$ .

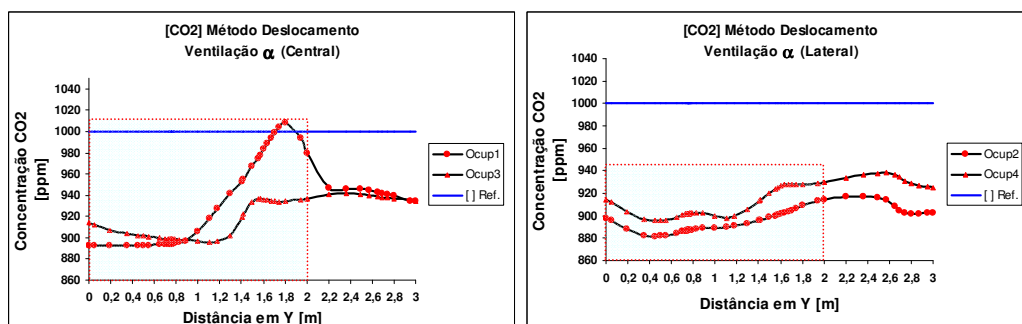


Figura 4.18: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\alpha$ .

### Assimetria vertical $\gamma$

A contemplação do agravamento do caudal de ar novo por eficácia de ventilação para os métodos mistura, cruzado e deslocamento com os respectivos valores de 0.92, 0.92 e 0.5, permitiu para os pontos de medição referidos na Tabela 4.1, atingir indubitavelmente os critérios de conforto e qualidade térmica para um nível de concentração de CO<sub>2</sub> abaixo dos 1000 ppm conforme as Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21.

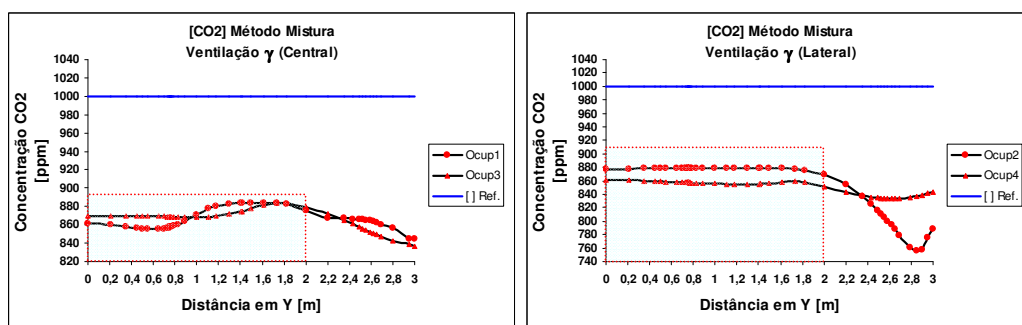


Figura 4.19: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\gamma$ .

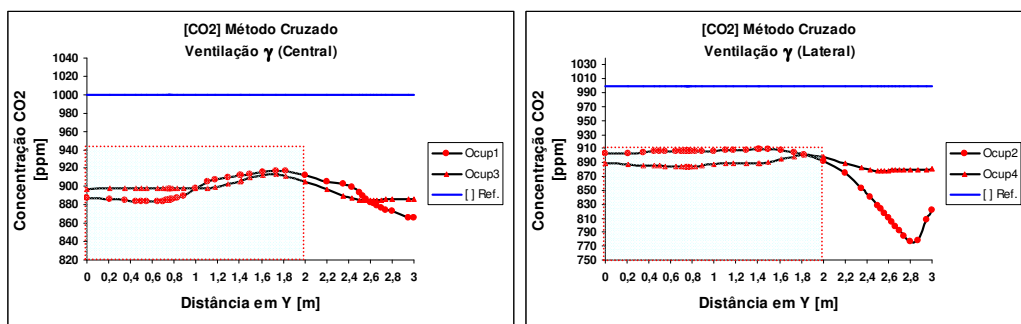


Figura 4.20: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\gamma$ .

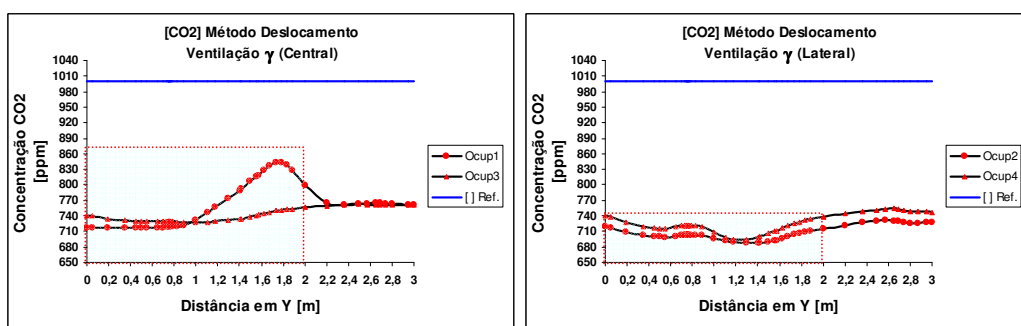


Figura 4.21: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\gamma$ .

### *Campo de idade média do ar*

Apresenta-se nesta secção de uma forma complementar à análise de concentração de CO<sub>2</sub>, a representação do campo de idade média do ar como pretensão de avaliar o grau de estagnação do ar nos diversos pontos. Neste caso analisa-se apenas o método  $\gamma$  aplicado aos métodos de mistura, cruzado e deslocamento. É efectuada uma análise do campo de idade média do ar no plano de corte horizontal XZ com y a adquirir o valor de 1.692 m, e no plano de corte vertical XY com z a adquirir o valor como ponto central da sala de aula de 2.5 e 3.07 para correcção das prioridades da malha.

### **Ventilação $\gamma$ (plano XZ\_XY)**

Efectuando uma macro-análise à Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24, verifica-se que o método de deslocamento de acordo com o plano de corte XY (Z=3.07), apresenta as melhores condições de qualidade do ar interior, derivado de um menor tempo de residência do ar na zona de ocupação (cerca de 129 segundos face aos 159 segundos e 211 segundos respectivamente para o método de mistura e cruzado). Verifica-se uma estagnação do ar vertical na zona de respiração para os métodos de mistura e cruzado, e uma estagnação do ar



horizontal no método de deslocamento com maior tempo de residência acima da zona de ocupação. Verifica-se o contributo do método de deslocamento como catalisador da estratificação do ar, favorecendo a qualidade do ar na zona que se pretende garantir, correspondendo à zona de ocupação.

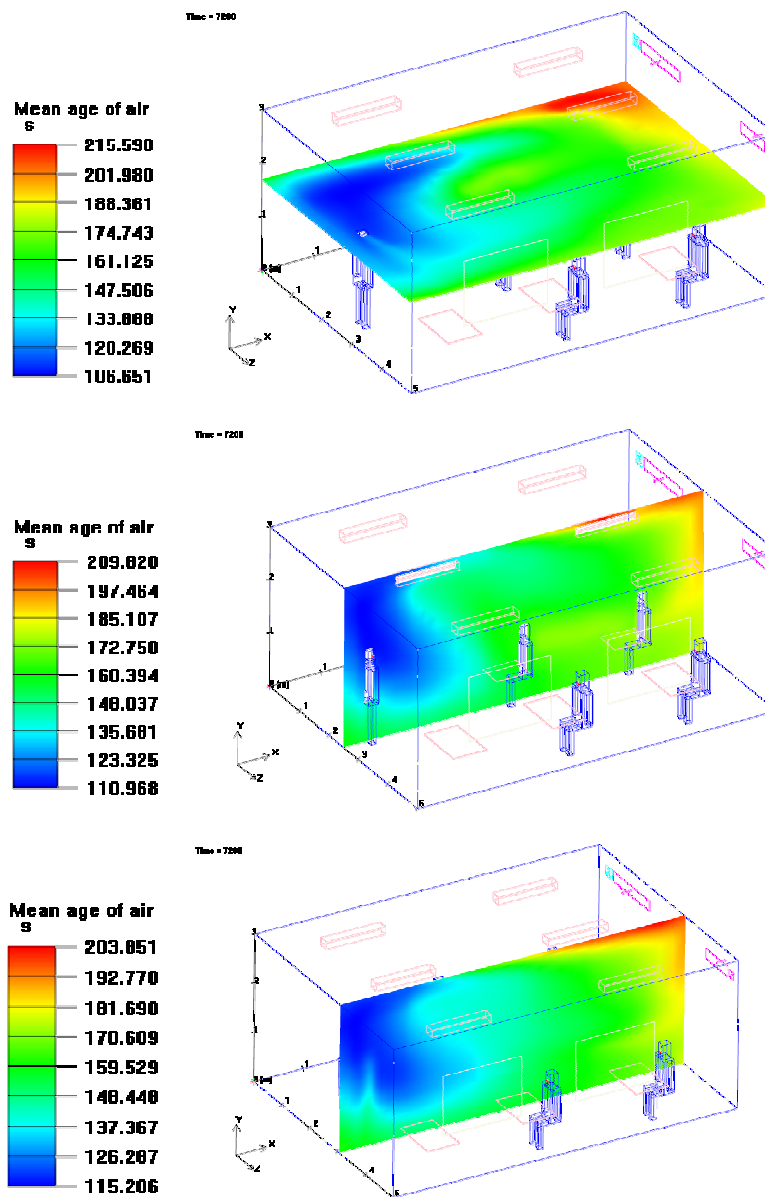


Figura 4.22: Distribuição da idade média do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ) e XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

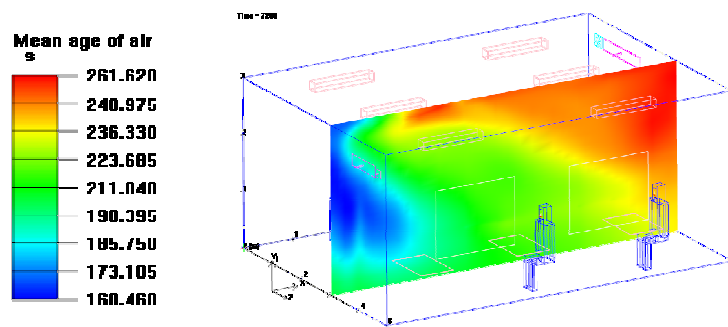
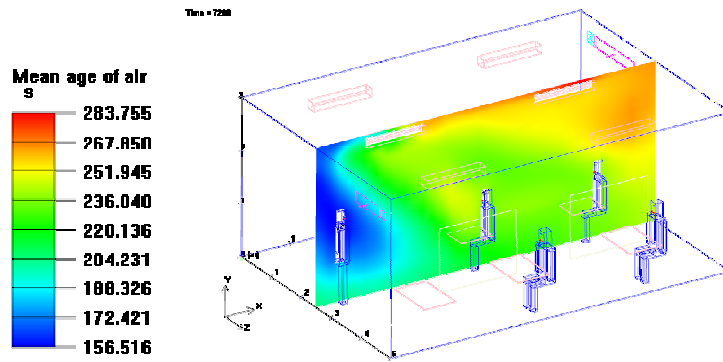
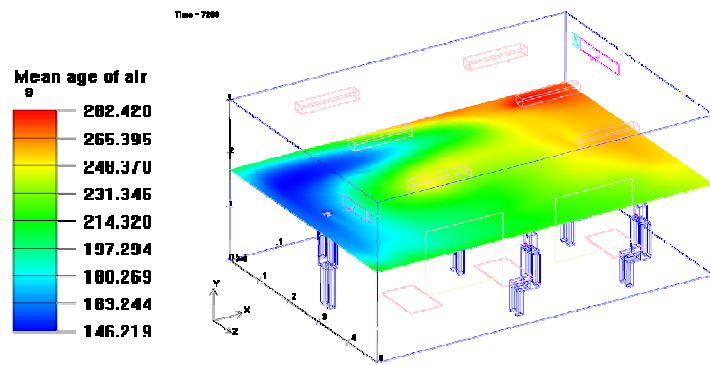
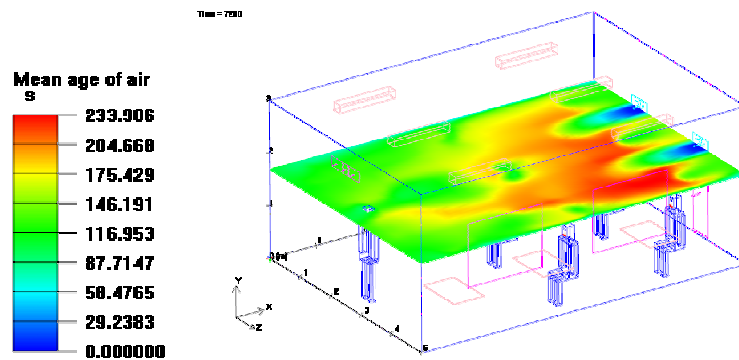


Figura 4.23: Distribuição da idade média do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ) e XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).



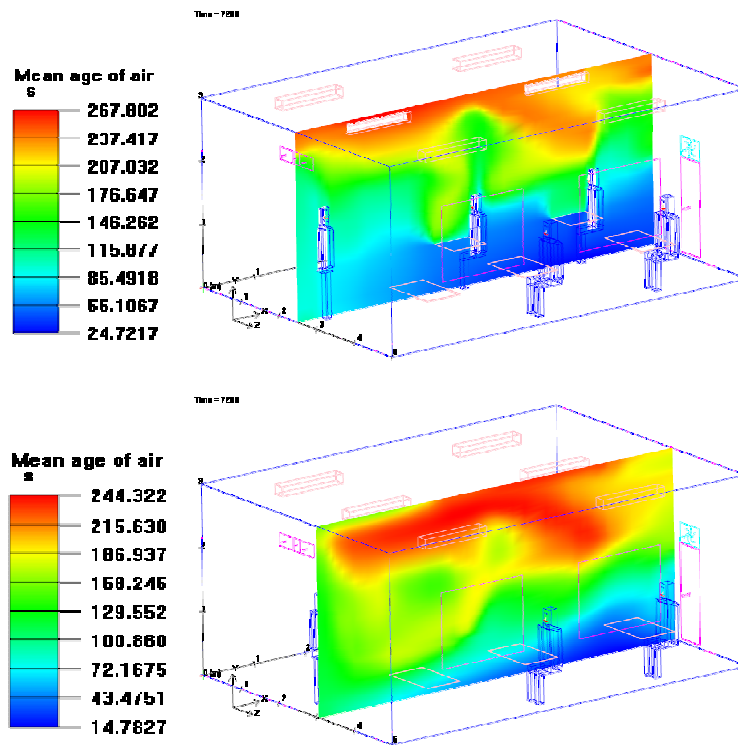


Figura 4.24: Distribuição da idade média do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ) e XY ( $Z=2.5 \wedge Z=3.07$ ).

### *Campo de trajectória de partículas*

Apresenta-se nesta secção igualmente como complementaridade à análise da concentração de  $\text{CO}_2$ , a evolução da trajectória das partículas desde a sua entrada no volume da sala de aula até à sua saída. Neste caso analisa-se apenas o método  $\gamma$  aplicado aos métodos de mistura, cruzado e deslocamento.

### ***Ventilação $\gamma$***

Na Figura 4.25 encontra-se representada a trajectória das partículas de ar desde a grelha de insuflação até à grelha de retorno e exaustão. Verifica-se um varrimento do ar praticamente por todo o volume da sala de aula e uma recirculação acentuada acima da zona ocupada, promovida trajectória circular do fluxo de ar entre a insuflação e o retorno/exaustão.

O método cruzado representado pela Figura 4.26 apresenta a trajectória das partículas de ar com início na grelha de insuflação e final na grelha de retorno e exaustão na zona frontal. Repara-se na zona central a existência de um fluxo rotacional ascendente no sentido da grelha de retorno, provocado por forças de arrastamento, sendo minimizado o efeito de vorticidade e magnitude de recirculação relativamente ao método de mistura. Este efeito torna-se evidente devido à existência de um “curto-circuito” de ar, levando a uma incorrecta distribuição do fluxo

de ar no espaço, minimizando consequente a condução do caudal mássico de ar para a 3ª fila de ocupantes.

A Figura 4.27 apresenta as linhas de corrente das partículas de ar, sendo o gradiente de pressão no sentido das grelhas de retorno e exaustão. Verifica-se a existência de trajectórias de partículas a nível do solo e a nível do tecto e a existência de um ponto de recirculação na proximidade da insuflação, onde as velocidades são mais elevadas. A Figura 4.27 explica o fenómeno do aparecimento de um pico de concentração de  $\text{CO}_2$  na zona do ocupante de pé (ver Figura 4.15), derivado da inexistência de linhas de corrente ao nível da respiração do ocupante, promovendo a estagnação do ar nesse ponto.

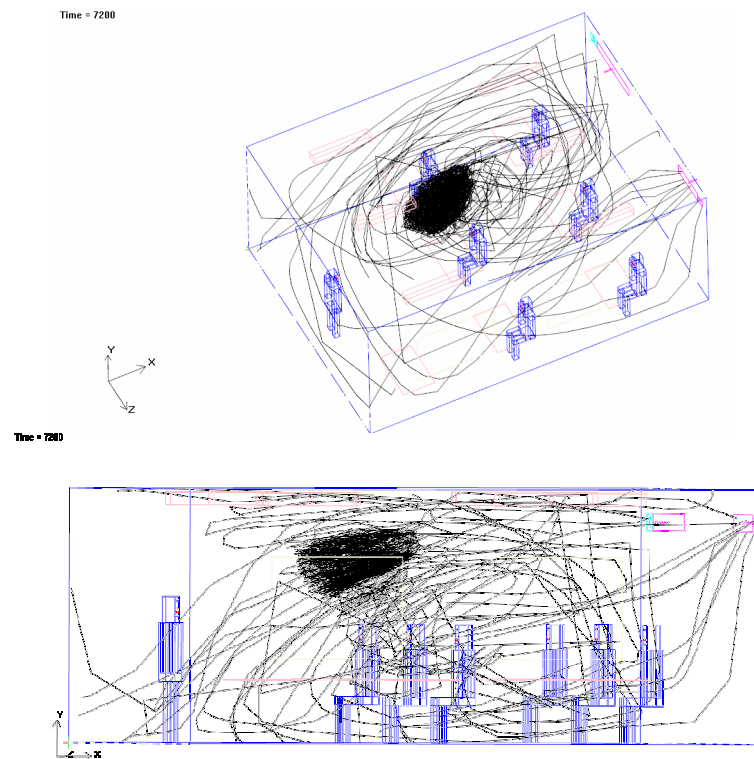


Figura 4.25: Trajectória das partículas de ar no método de mistura para o método  $\gamma$ .

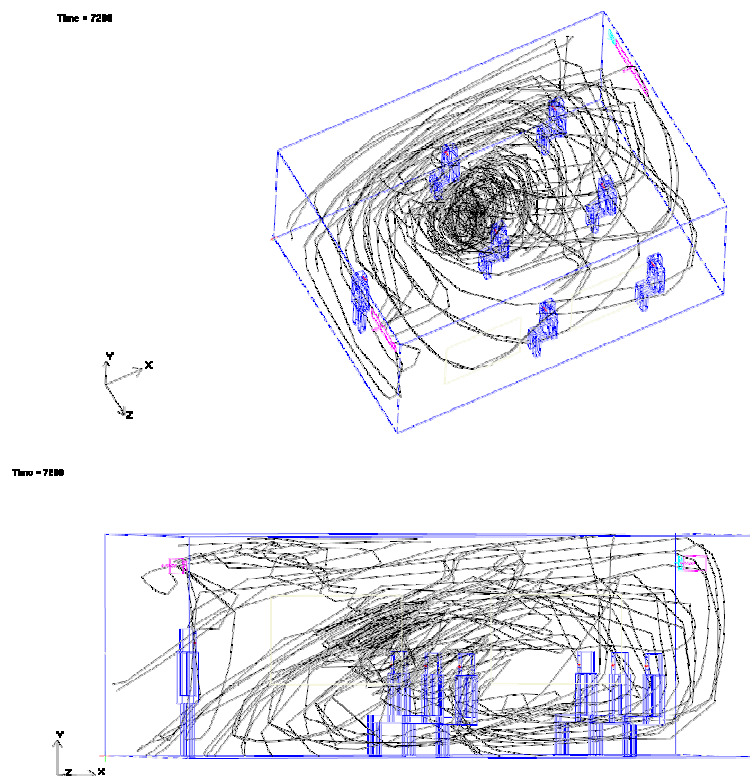


Figura 4.26: Trajectória das partículas de ar no método cruzado para o método  $\gamma$ .

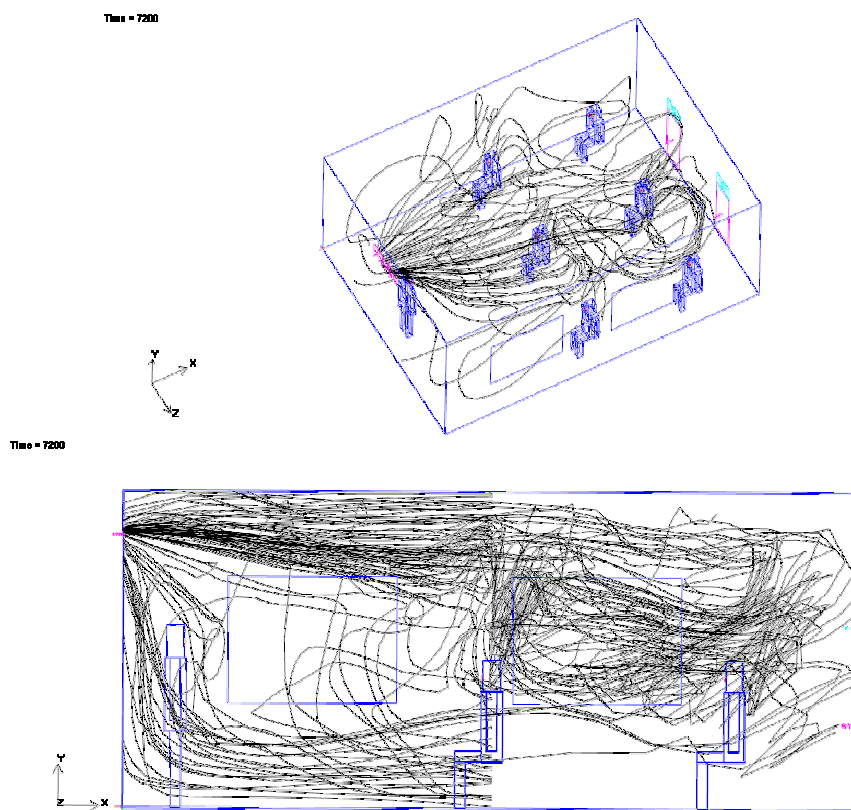


Figura 4.27: Trajectória das partículas de ar no método deslocamento para o método  $\gamma$ .

## *Campo contorno e vectorial de velocidade*

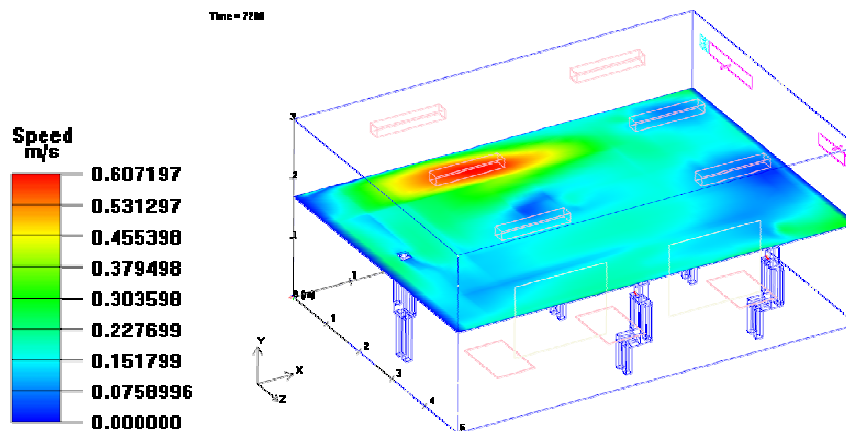
Apresenta-se nesta secção o campo de contorno e vectorial da distribuição de velocidade do ar. Neste caso apresenta-se o método  $\gamma$  aplicado aos métodos de mistura, cruzado e deslocamento, e a evolução das assimetrias verticais para o método  $\alpha$  e  $\gamma$ .

### ***Ventilação $\gamma$ (plano XZ)***

A Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30, representam para o método de ventilação  $\gamma$ , o campo de contorno e vectorial de velocidade do ar correspondendo respectivamente às filas da esquerda, central e direita da sala de aula para o método mistura, cruzado e deslocamento no plano de corte XZ com  $y$  a adquirir o valor de 1.692 m.

Verifica-se no método de mistura e no método cruzado respectivamente na Figura 4.28 e Figura 4.29, uma velocidade do ar junto ao ocupante sentado na 1ª fila, superior ao critério regulamentar de 0.2 m/s [3].

O método de deslocamento representado na Figura 4.30, apresenta na sua plenitude o cumprimento da velocidade regulamentar por toda a zona ocupada. As velocidades médias do ar neste método são relativamente baixas, promovendo o fenómeno de pluma térmica por cima dos ocupantes (vector velocidade ascendente), contribuindo para a estratificação do ar pretendida.



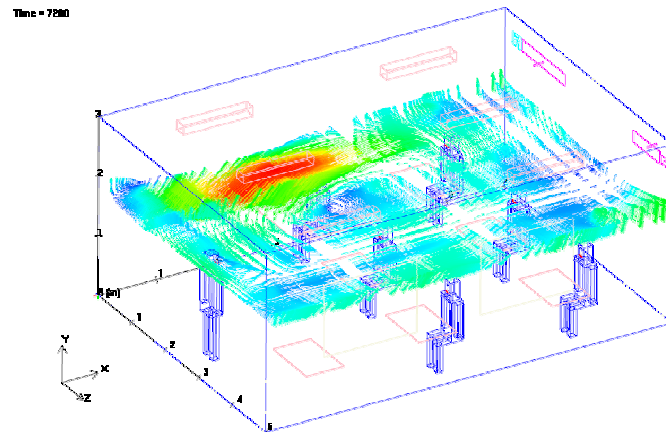


Figura 4.28: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ).

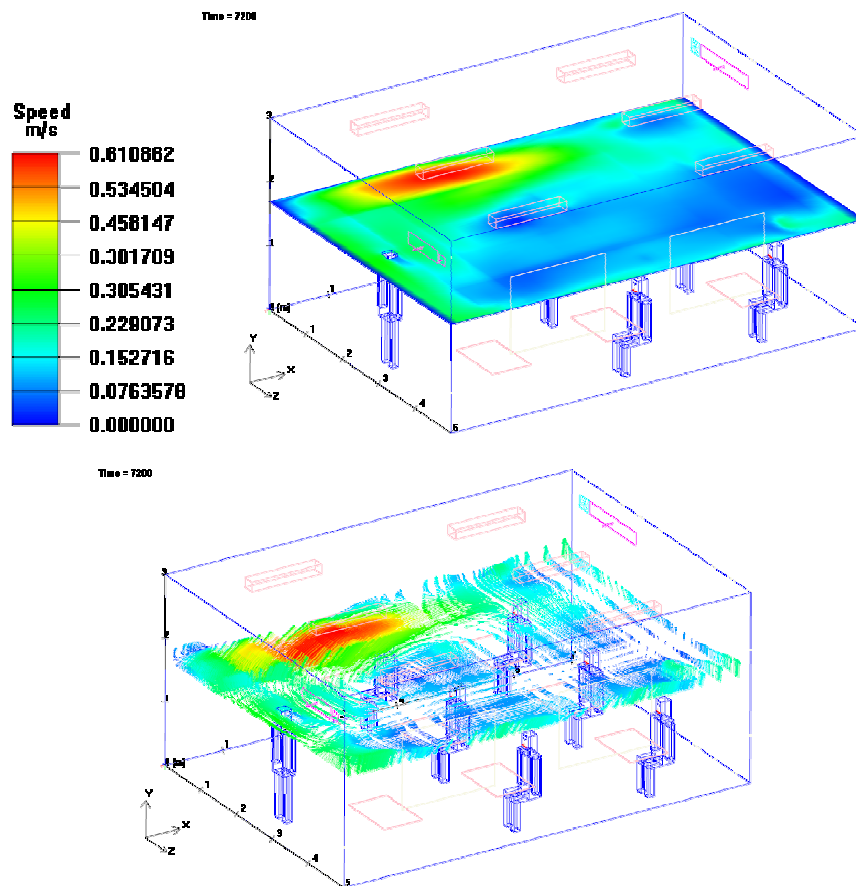


Figura 4.29: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ).

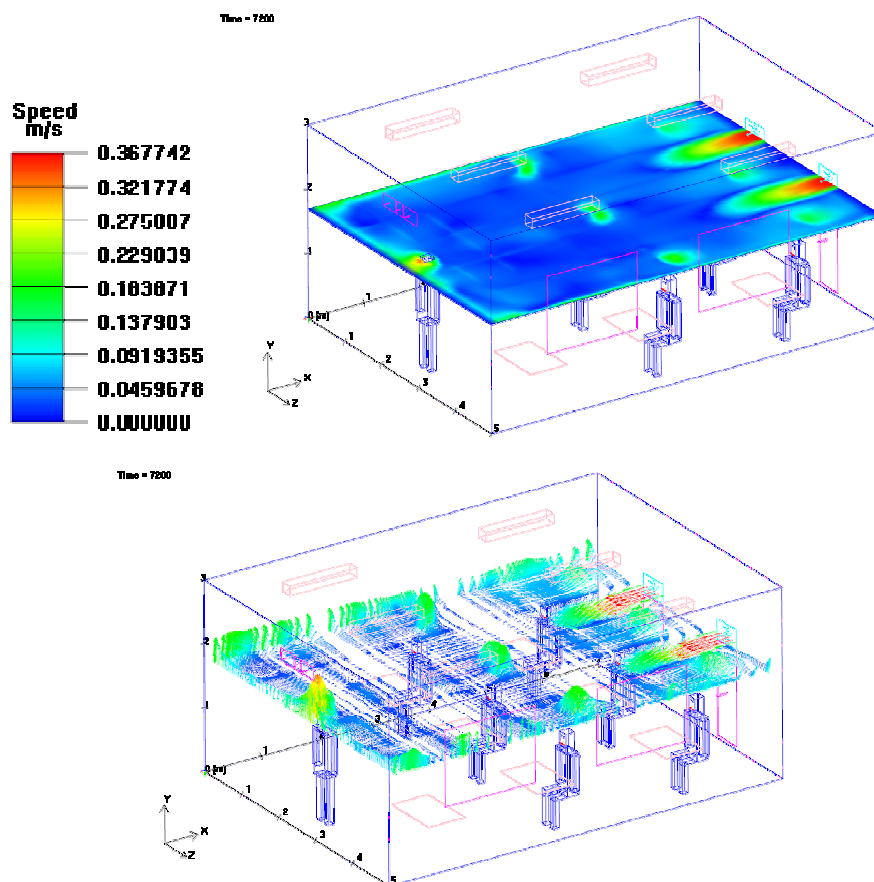


Figura 4.30: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ).

### **Ventilação $\gamma$ (plano XY)**

É apresentado o campo de contorno e vectorial de velocidade do ar nas 3 filas de ocupantes para o método de ventilação  $\gamma$ , no plano de corte XY com  $z$  a adquirir o valor de 0.47 e 2.5 m e  $z$  a adquirir o valor de 1.165 e 3.07 m devido à correcção de prioridade de malhas.

A Figura 4.31 e Figura 4.32 associada ao método mistura e a Figura 4.33 e Figura 4.34 associada ao método cruzado, representam a trajectória do decaimento do ar após a insuflação para a zona não ocupada. Verifica-se contudo uma velocidade excessiva no ocupante sentado da primeira fila, ao nível da cabeça apenas, pelo que o recuo em cerca de 1 m corresponderia a uma melhoria da velocidade para cerca de 0.16 m/s, verificando-se o cumprimento regulamentar dos 0.2 m/s. O método de deslocamento representado pela Figura 4.35 e Figura 4.36, apresenta na zona de ocupação uma velocidade inferior a 0.2 m/s, com um vector de velocidade ascendente, promovendo a estratificação do ar.

As Figura 4.37 e Figura 4.38 associado ao método mistura e Figura 4.39 e Figura 4.40 associado ao método cruzado, representam junto do ocupante de pé, uma velocidade de ar ligeiramente excessiva, provocado pela deflexão na parede frontal do caudal de insuflação no



sentido do gradiente de pressão. No restante volume verifica-se contudo velocidades de ar residuais, mantendo-se dentro dos critérios regulamentares. As Figura 4.41 e Figura 4.42 representam o método de deslocamento, verificando-se uma velocidade do ar máxima na zona de ocupação em cerca de 0.16 m/s.

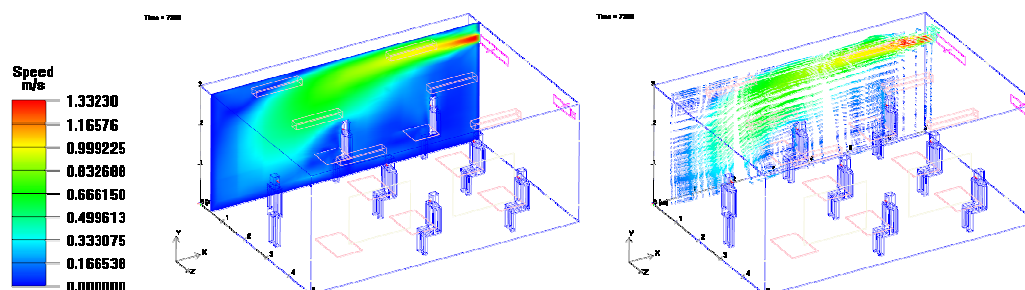


Figura 4.31: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ).

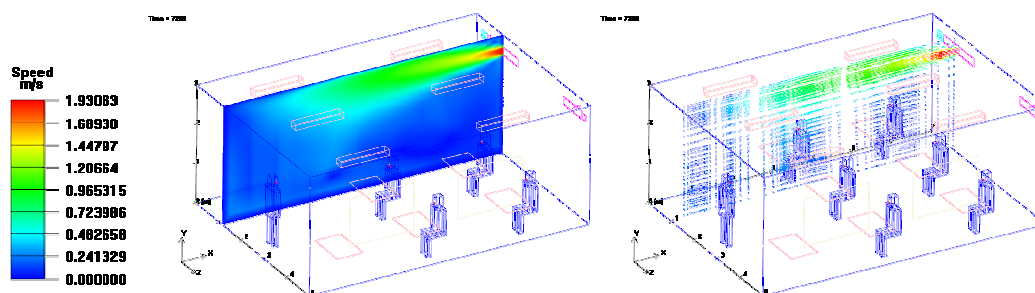


Figura 4.32: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ).

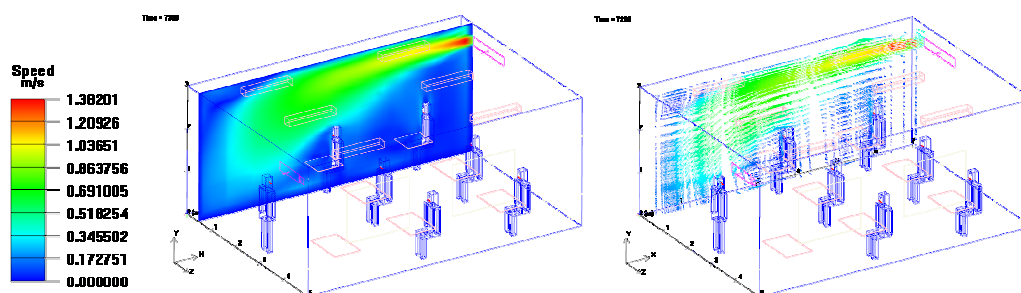


Figura 4.33: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ).

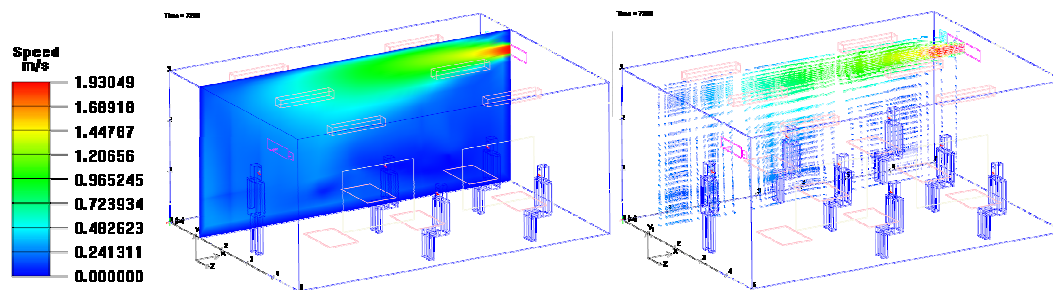


Figura 4.34: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ).

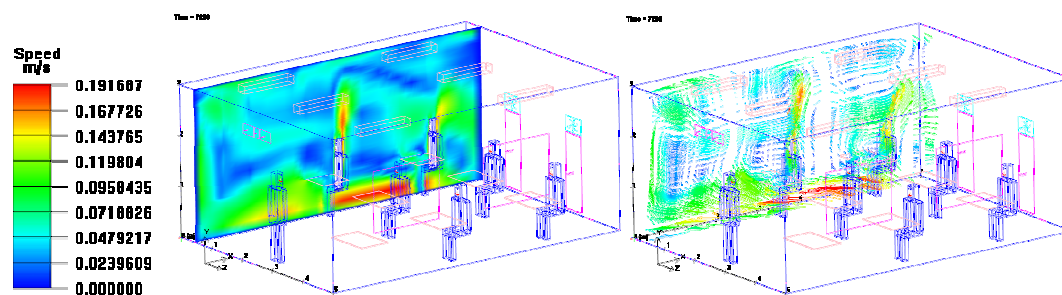


Figura 4.35: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ).

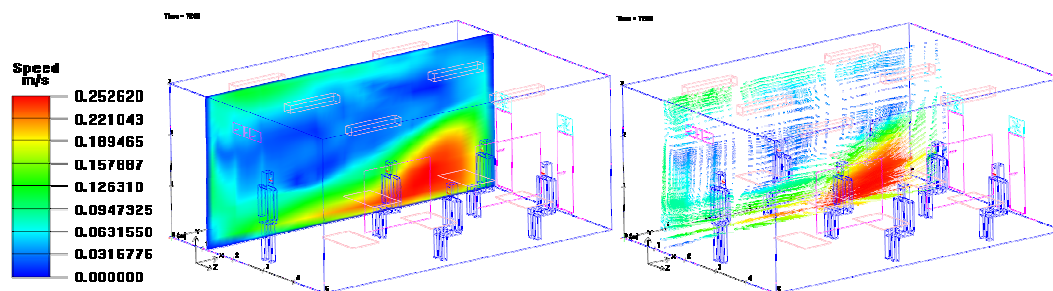


Figura 4.36: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ).

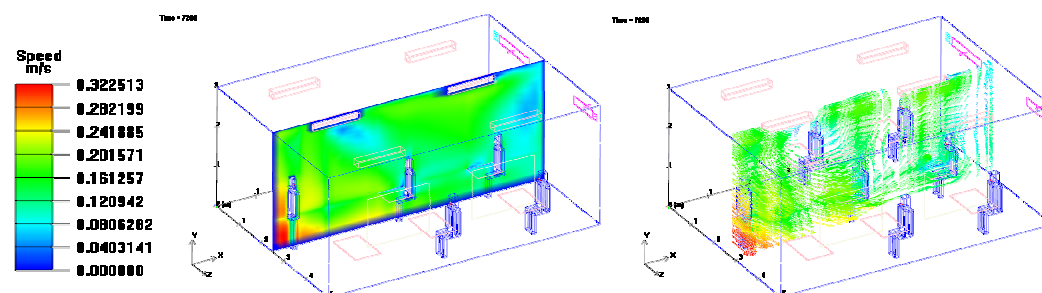


Figura 4.37: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ).

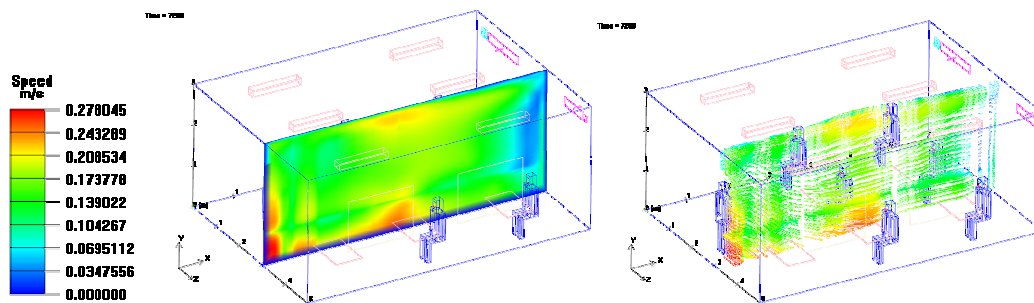


Figura 4.38: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ).

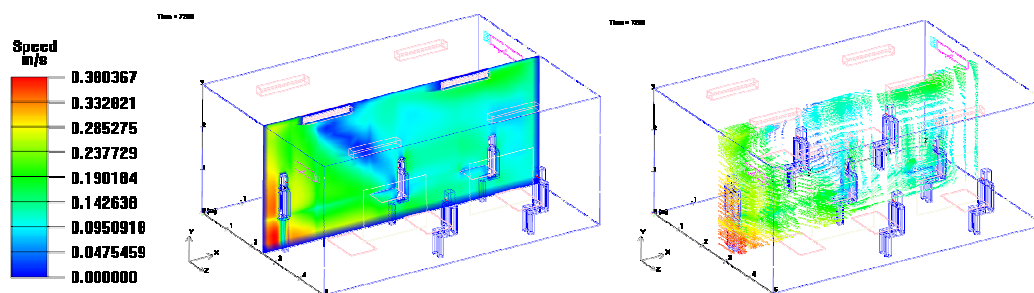


Figura 4.39: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ).

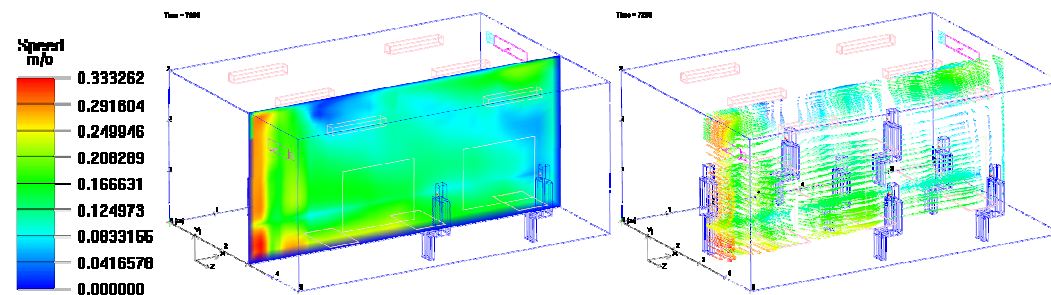


Figura 4.40: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ).

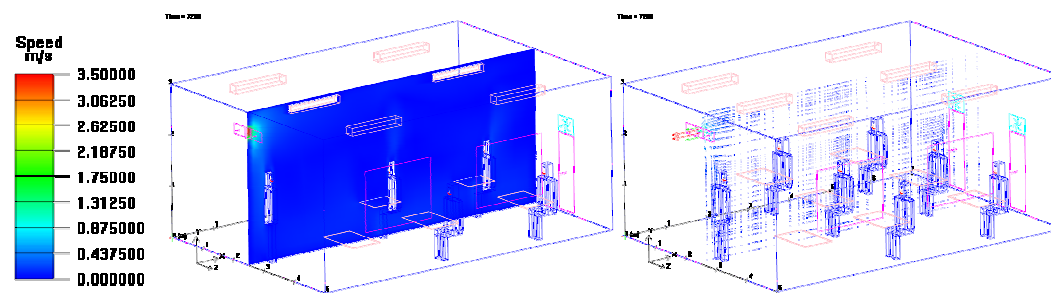


Figura 4.41: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ).

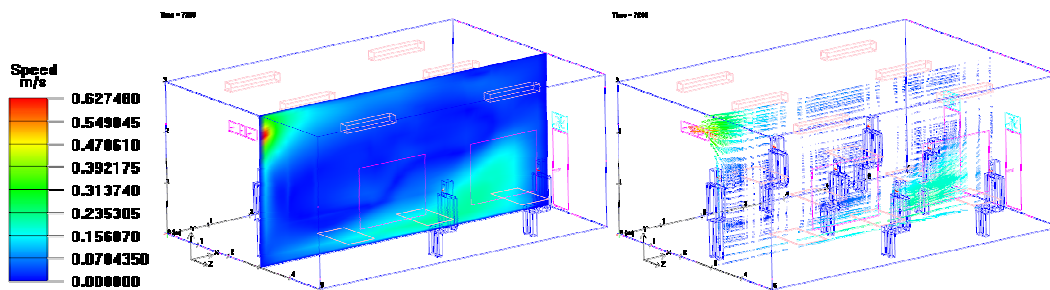


Figura 4.42: Campo de contorno e vectorial da velocidade do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ).

### ***Assimetria vertical $\alpha$***

Verifica-se na Figura 4.43 e Figura 4.44 associada respectivamente ao método mistura e cruzado, uma velocidade do ar superior a 0.2 m/s acima da altura de 1.2 metros no ocupante sentado por cima da insuflação de ar (Ocup2). Relativamente ao ocupante de pé (Ocup1), dado o ponto de medição ser efectuado a cerca de 1.3 m da sua localização, a velocidade do ar no perfil vertical é de uma forma global inferior ao valor de 0.2 m/s. A velocidade do ar de 0.25 m/s que se verifica a uma altura de 0.2 m revela a deflexão efectuada na parede frontal e consequente redireccionamento para a zona do ocupante de pé (Ocup1).

No ocupante (Ocup2) da Figura 4.43 e Figura 4.44 (Ventilação  $\alpha$  lateral) é pronunciada uma evolução vertical crescente da velocidade do ar aproximadamente hiperbólica à medida que se aproxima o fluxo de ar novo. Verifica-se um ponto de inflexão a 2.6 metros de altura derivado do afastamento do fluxo de ar novo do tecto por decaimento associado à redução de velocidade e do diferencial de massa específica face ao meio de difusão. Encontra-se igualmente ligado, o fenómeno da velocidade zero da superfície do tecto, com dependência ao grau de refinação da malha.

A Figura 4.45 representa o método de deslocamento com uma variação vertical da velocidade do ar a partir do solo aproximadamente hiperbólica, associado ao fenómeno de velocidade zero da superfície do chão e com uma evolução dependente da refinação da malha nessa zona.

Realça-se o fenómeno irregular apresentado na Figura 4.43 e Figura 4.44 (Ventilação  $\alpha$  central), a uma distância  $y$  de 0.8, em que a malha considera o objecto mesa localizado nas coordenadas  $x,y(1,4)$  na Figura 4.5 com uma prioridade superior, afectando o campo de velocidades com a redução da velocidade do escoamento à altura referida. Na Figura 4.44 (Ventilação  $\alpha$  central), a uma altura de 2.6 m, é representado um ligeiro aumento da velocidade e posterior redução para o valor nulo, devendo-se ao comportamento do escoamento face à existência da armadura da iluminação.

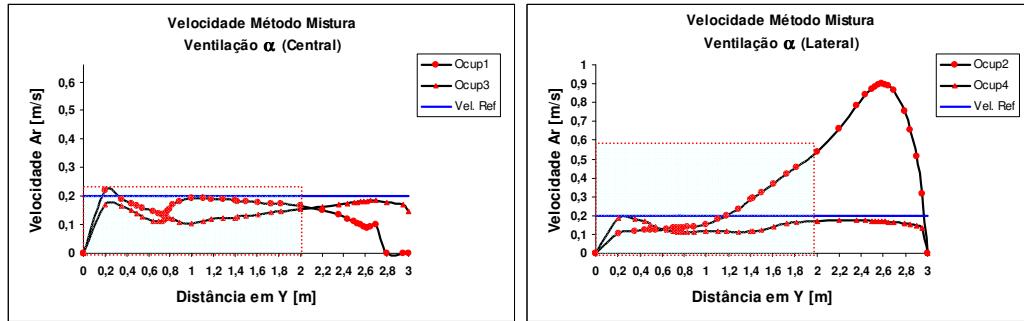


Figura 4.43: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\alpha$ .

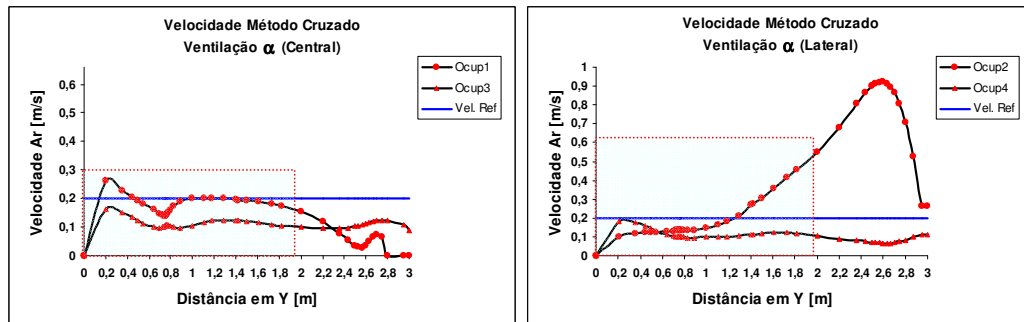


Figura 4.44: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\alpha$ .

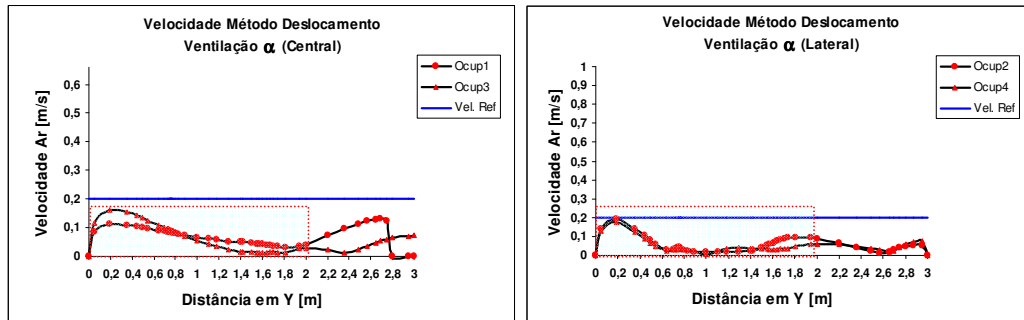


Figura 4.45: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\alpha$ .

### ***Assimetria vertical $\gamma$***

O aumento da quantidade de ar novo considerado nos três métodos de ventilação correspondendo ao método de mistura, cruzado e deslocamento nas Figura 4.46, Figura 4.47 e Figura 4.48 respectivamente, não apresenta diferenças de velocidade do ar nos perfis verticais comparativamente ao método  $\alpha$ , devido à garantia da mesma velocidade de insuflação do ar nas grelhas de insuflação, retorno e exaustão.

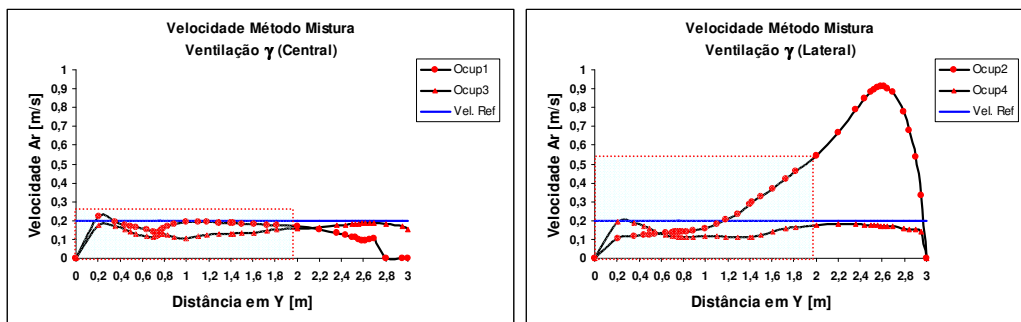


Figura 4.46: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\gamma$ .

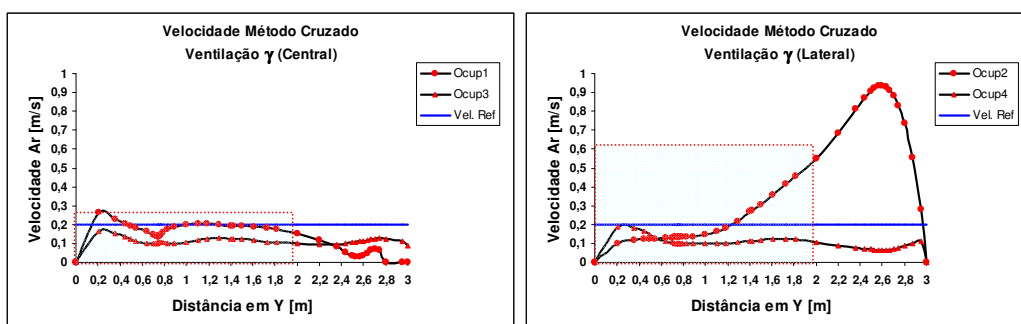


Figura 4.47: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\gamma$ .

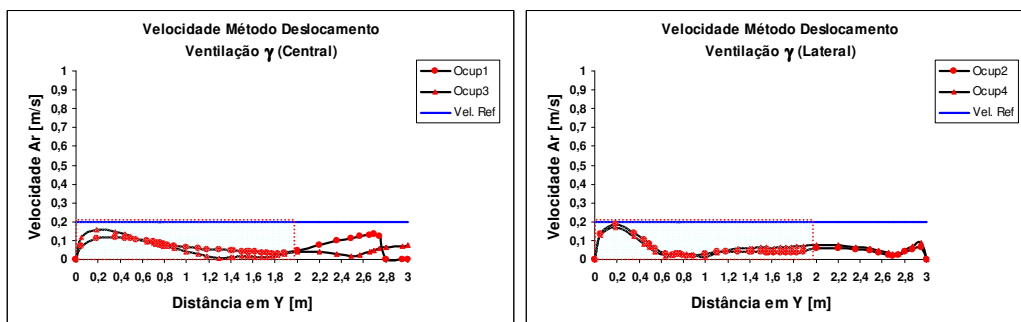


Figura 4.48: Evolução da velocidade do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\gamma$ .

### *Campo de temperatura*

Nesta secção apresenta-se os diferentes planos de corte relativamente à distribuição de temperatura do ar. Apresenta-se os resultados apenas do método  $\gamma$  aplicado aos métodos de mistura, cruzado e deslocamento e a evolução das assimetrias verticais para o método  $\alpha$  e  $\gamma$ .

### Ventilação $\gamma$ (plano XZ)

A Figura 4.49, Figura 4.50 e Figura 4.51 representam respectivamente o método mistura, cruzado e deslocamento no plano de corte XZ com y a adquirir o valor de 1.692 m, com o campo de distribuição de temperatura do ar correspondendo respectivamente às filas da esquerda, central e direita da sala de aula para o método de ventilação  $\gamma$ .

Verifica-se de uma forma global, uma uniforme distribuição da temperatura do ar, com valores compreendidos entre os 22 e os 24 °C.

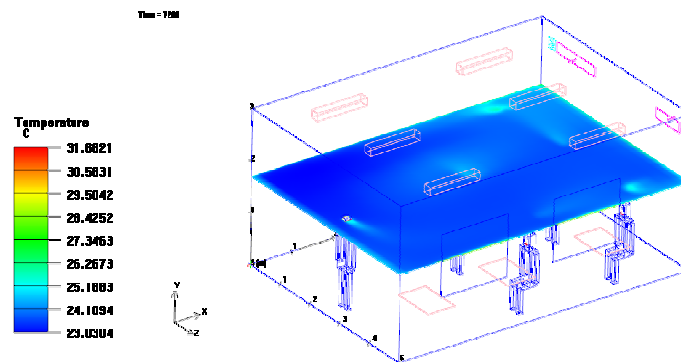


Figura 4.49: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ).

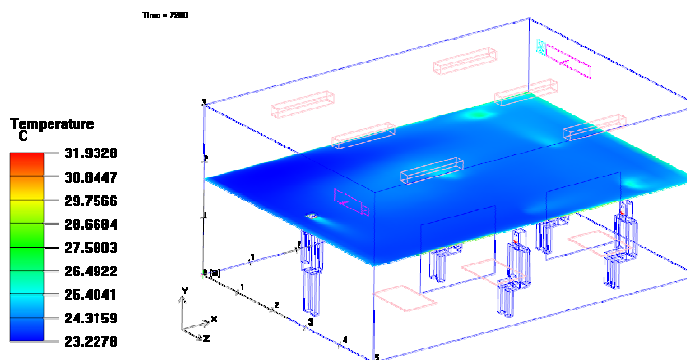


Figura 4.50: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ).

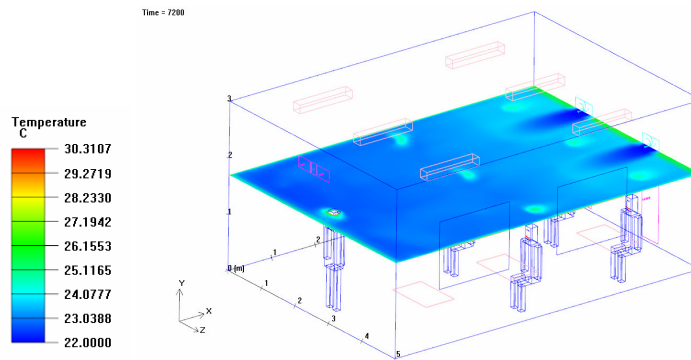


Figura 4.51: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XZ ( $y=1.692$ ).

### ***Ventilação $\gamma$ (plano XY)***

É apresentado o campo de distribuição vertical de temperatura do ar das 3 filas de ocupantes para o método de ventilação  $\gamma$ , no plano de corte XY com  $z$  a adquirir o valor de 0.47m e 2.5 m e  $z$  a adquirir o valor de 1.165 e 3.07 m devido à correcção de prioridade de malhas.

A Figura 4.52 e Figura 4.53 associada ao método mistura e a Figura 4.54 e Figura 4.55 associado método cruzada, verifica uma distribuição relativamente homogénea na temperatura do ar, no entanto é de referir a diminuição da temperatura em cerca de 1 °C na proximidade da parede frontal da grelha de insuflação devido ao decaimento do fluxo de insuflação nessa localização.

A Figura 4.56 e Figura 4.57, correspondendo ao método de deslocamento, apresenta uma estratificação do ar até à zona limite de ocupação em cerca de 3 °C, encontrando-se enquadrado nos requisitos da ISO 7730:1994 [57], onde se prevê um gradiente térmico máximo vertical na zona de ocupação de 4 °C.

A Figura 4.58 e Figura 4.59 correspondendo ao método mistura, a Figura 4.60 e Figura 4.61 correspondendo ao método cruzado e as Figura 4.62 e Figura 4.63 correspondendo ao método deslocamento apresentam uma distribuição de temperatura do ar idêntica aos valores homólogos obtidos no plano de corte XZ com  $z$  (0.47  $\wedge$  1.165).

Verifica-se de uma forma generalizada o cumprimento da ISO 7730:1994 [57], com os valores de temperatura do chão inclusive a cumprir os requisitos máximos entre  $19 < T_{\text{chão}} [^{\circ}\text{C}] < 26$ .



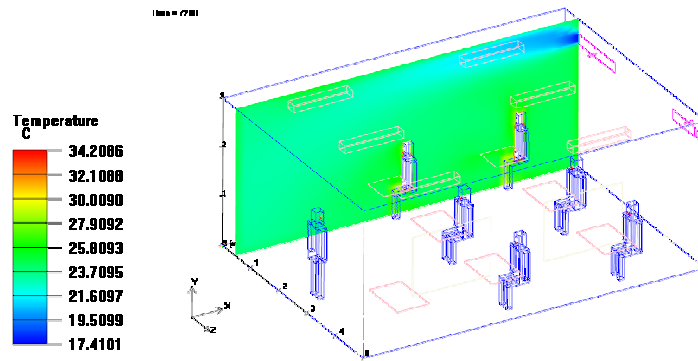


Figura 4.52: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ).

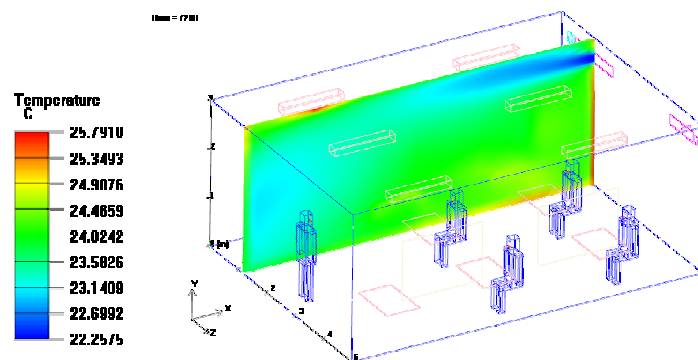


Figura 4.53: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ).

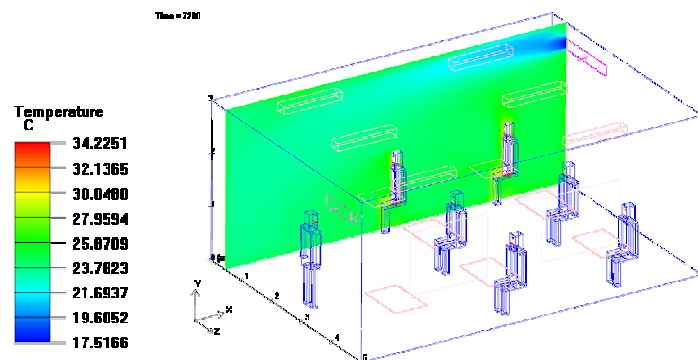


Figura 4.54: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ).

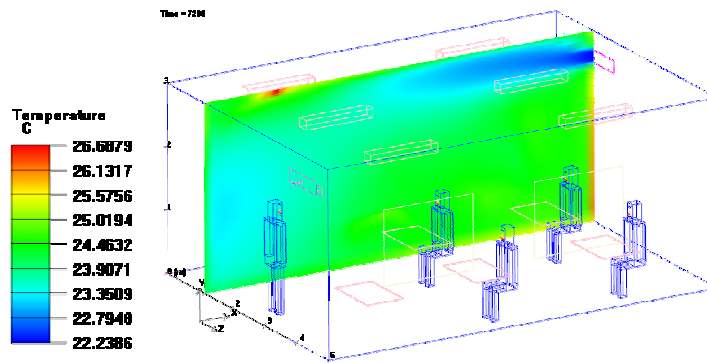


Figura 4.55: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ).

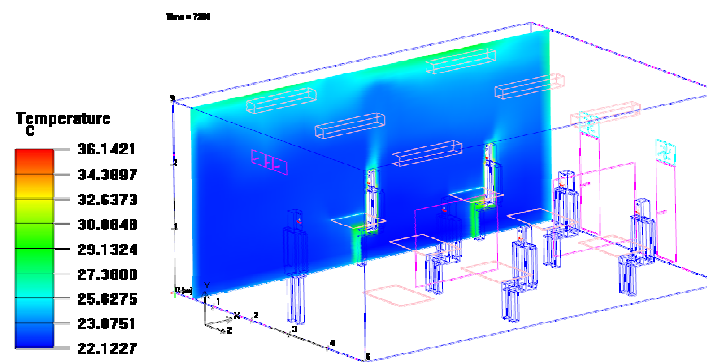


Figura 4.56: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=0.47$ ).

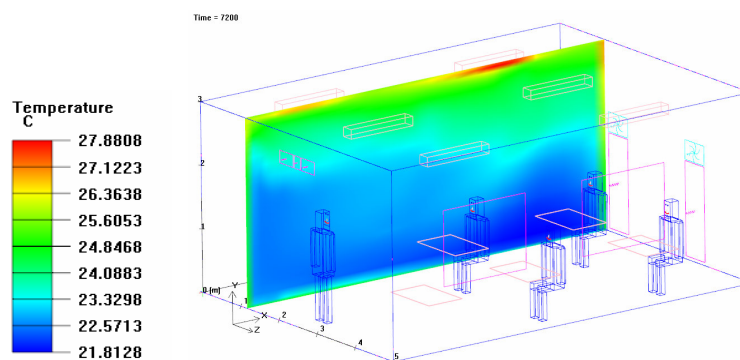


Figura 4.57: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=1.165$ ).

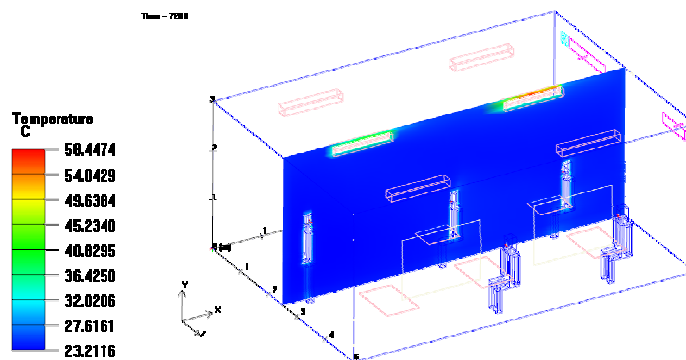


Figura 4.58: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ).

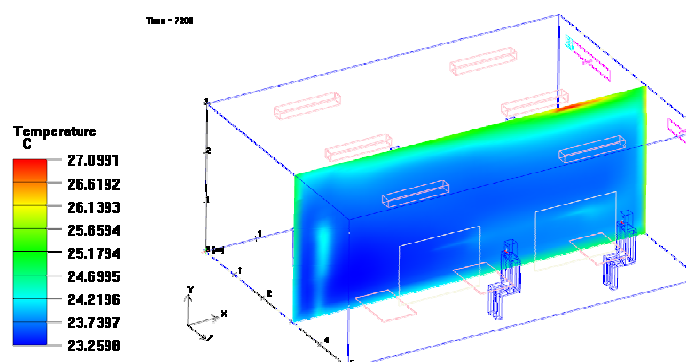


Figura 4.59: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ).

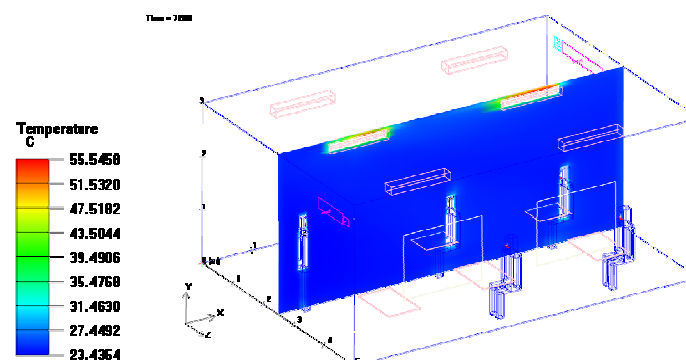


Figura 4.60: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ).

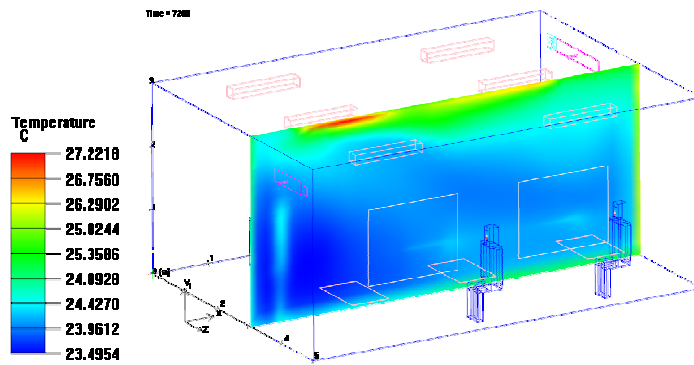


Figura 4.61: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ).

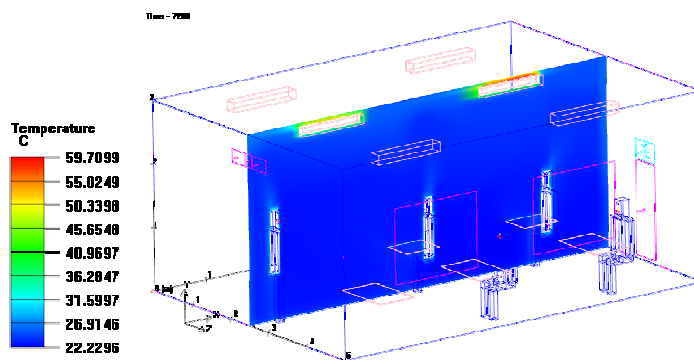


Figura 4.62: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=2.5$ ).

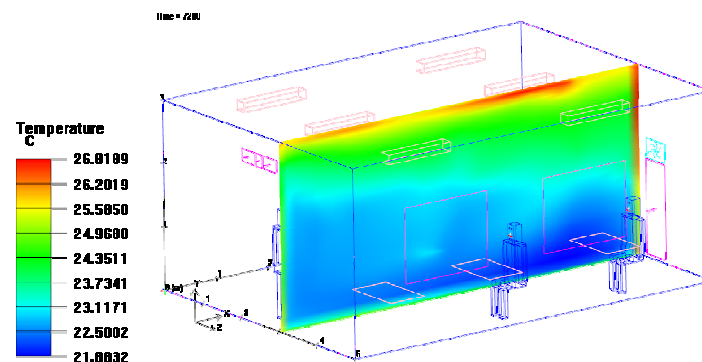


Figura 4.63: Campo de distribuição de temperatura do ar do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $Z=3.07$ ).

### ***Assimetria vertical $\alpha$***

A Figura 4.64, Figura 4.65 e Figura 4.66 representa a evolução vertical da temperatura do ar de uma forma constante, referindo um pico de temperatura relativamente à evolução associada ao ocupante de pé (Ocup1), a uma altura de 2.8m, correspondendo à potência

térmica dissipada pela iluminação no tecto sob a forma de calor. Este fenómeno é igualmente repetido para a Figura 4.67, Figura 4.68 e Figura 4.69, referentes ao método  $\gamma$ .

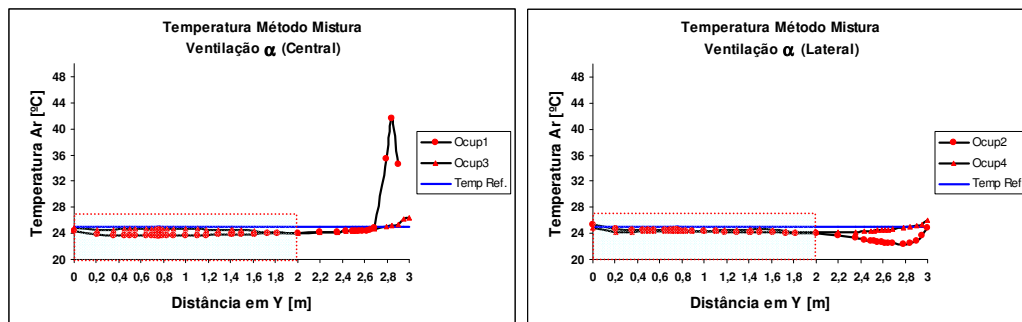


Figura 4.64: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\alpha$ .

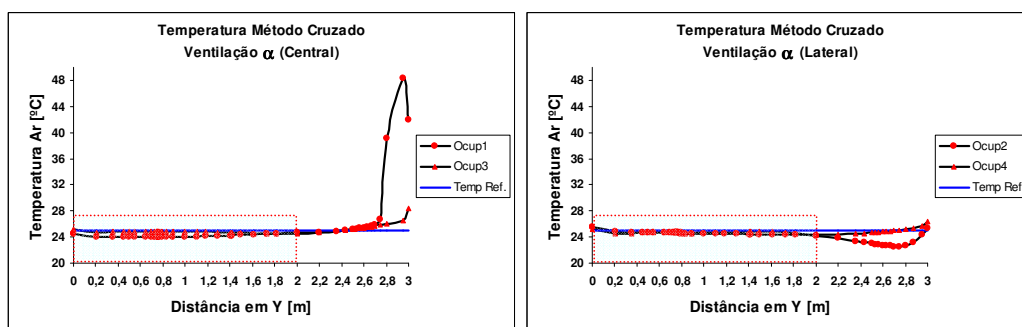


Figura 4.65: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\alpha$ .

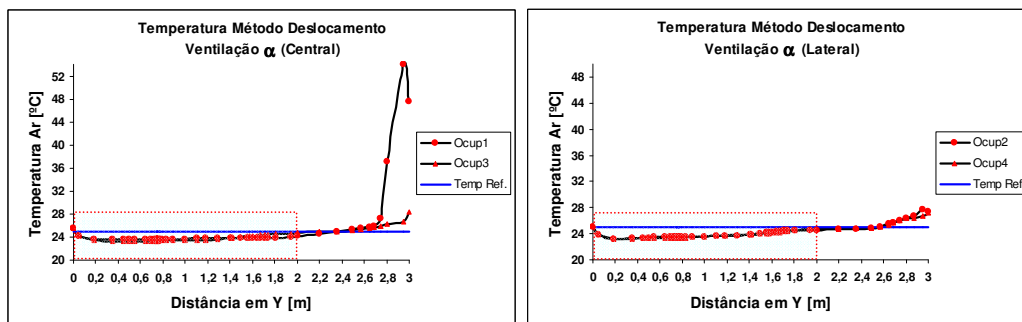


Figura 4.66: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\alpha$ .

### Assimetria vertical $\gamma$

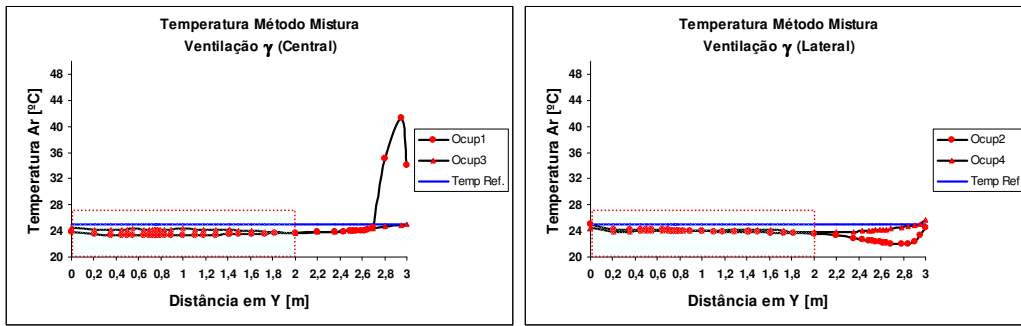


Figura 4.67: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\gamma$ .

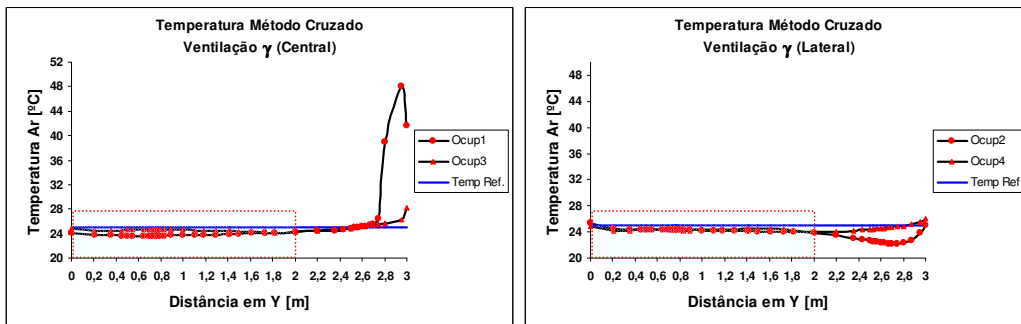


Figura 4.68: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\gamma$ .

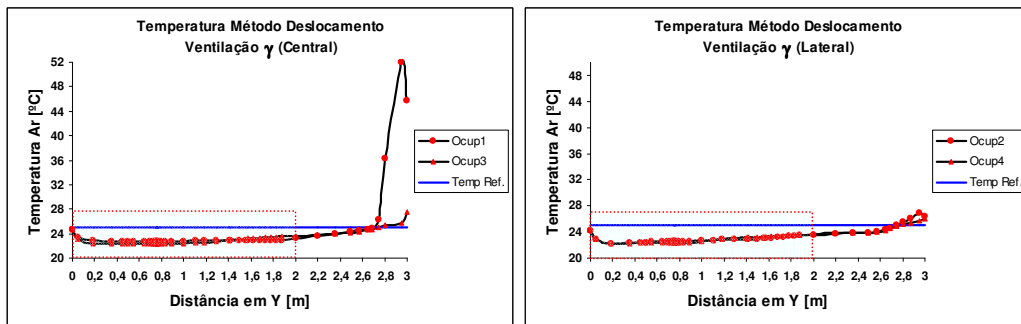


Figura 4.69: Evolução da temperatura do ar num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\gamma$ .

### Campo índice PMV e análise PPD

Nesta secção pretende-se avaliar o índice de conforto térmico através da determinação do voto médio previsível (PMV) e analogamente o índice de pessoas insatisfeitas (PPD). Neste caso apresenta-se o método  $\gamma$  com o plano de corte XY com z a adquirir o valor de 0.47m e 2.5 m, e z a adquirir o valor de 1.165m e 3.07m, com correcção da prioridade da malha. O campo

do índice de PMV e índice PPD são posteriormente analisados com base na análise de assimetrias verticais para o método  $\alpha$  e  $\gamma$ .

### ***Ventilação $\gamma$ (plano XY)***

A ISO 7730:1994 [57] define uma escala de sensação térmica, considerando um ambiente interior +3 (Muito Quente), +2 (Quente), +1 (Ligeiramente quente), 0 (Neutro), -1 (Ligeiramente frio), -2 (Frio) e -3 (Muito Frio). É caracterizado um ambiente termicamente aceitável, quando compreendido na escala entre  $-0.5 < PMV < 0.5$ . A Figura 4.70 e a Figura 4.71, representa para o método de mistura relativamente à 1ª fila de ocupantes sentados, a distribuição do índice PMV com a sensação térmica entre um ambiente ligeiramente quente (+1) e neutro (0), com maior proximidade ao valor neutro em cerca de 0.245. A Figura 4.72 e Figura 4.73, estabelecendo o plano de corte da 1ª fila de ocupantes sentados, representa para o método cruzado, em comparação ao método de mistura, uma sensação térmica ligeiramente mais quente (0.39), mantendo-se contudo entre a escala +1 e 0.

O método cruzado apresenta um valor de PMV ligeiramente mais quente, derivado do “curto-circuito” de ar demarcado pela trajectória do escoamento, promovendo uma diminuição do ar insuflado na zona ocupada e o consequente aumento de temperatura.

A Figura 4.74 e Figura 4.75 representa para o método de deslocamento uma sensação térmica do ambiente aproximadamente -0.10, correspondendo a uma sensação aproximadamente neutra, no entanto com convergência para o quadrante de ambiente interior entre 0 (neutro) e (-1 ligeiramente frio). A sensação térmica obtida deve-se com maior ponderação a uma insuflação na zona ocupada com um valor de temperatura de insuflação ligeiramente inferior à temperatura interior.

A Figura 4.76 e Figura 4.77 representam para o método mistura, o plano central, com um valor de índice de PMV aproximadamente 0.12, correspondendo a uma completa homogeneização do valor por todo o plano de corte.

A Figura 4.78 e Figura 4.79 representam para o método cruzado uma heterogeneidade no índice PMV, com um valor de -0.3 no ocupante de pé (com uma sensação próxima de ligeiramente frio), derivado do curto-circuito de ar directamente da grelha de insuflação para a grelha de retorno e exaustão localizada na parede frontal onde se encontra o ocupante de pé. Para os ocupantes sentados verifica-se um índice de PMV de 0.5 (ligeiramente quente), promovido pela insuficiência do caudal de insuflação na zona descrita.

A Figura 4.80 e Figura 4.81 representam para o método de deslocamento, no plano de corte central, um índice de PMV neutro, correspondendo às condições óptimas de conforto térmico com garantia da qualidade do ar interior.

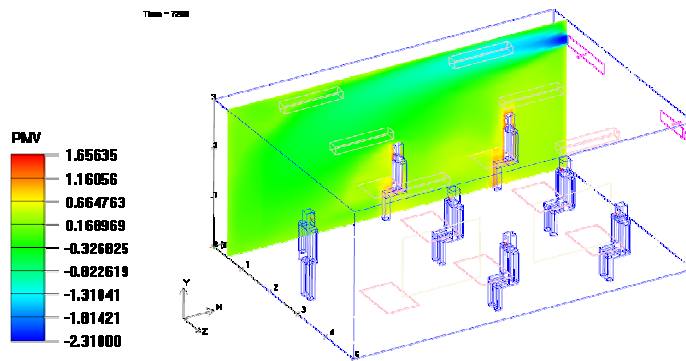


Figura 4.70: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $\gamma=0.47$ ).

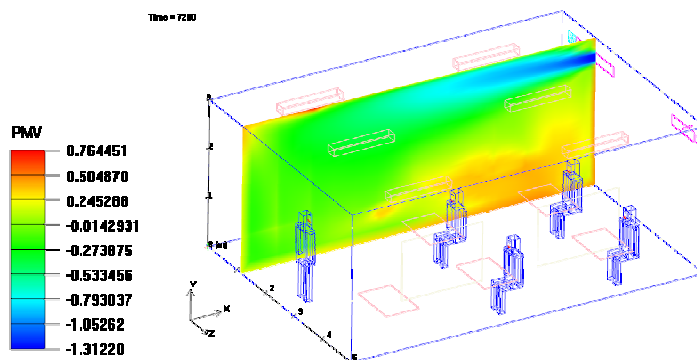


Figura 4.71: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $\gamma=1.165$ ).

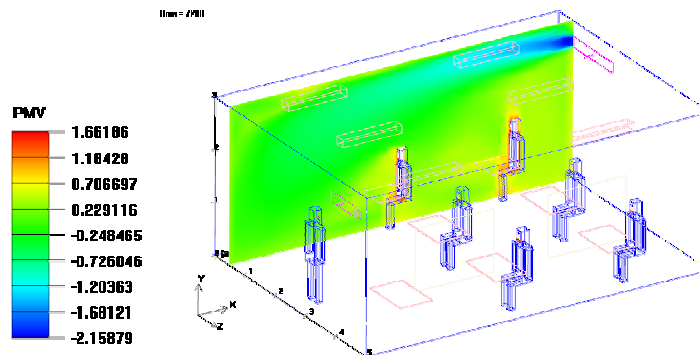


Figura 4.72: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $\gamma=0.47$ ).



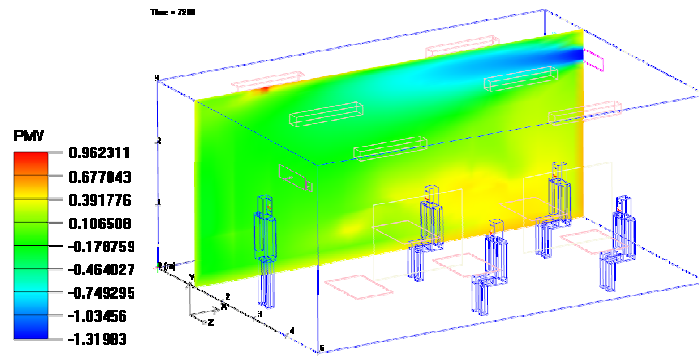


Figura 4.73: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=1.165$ ).

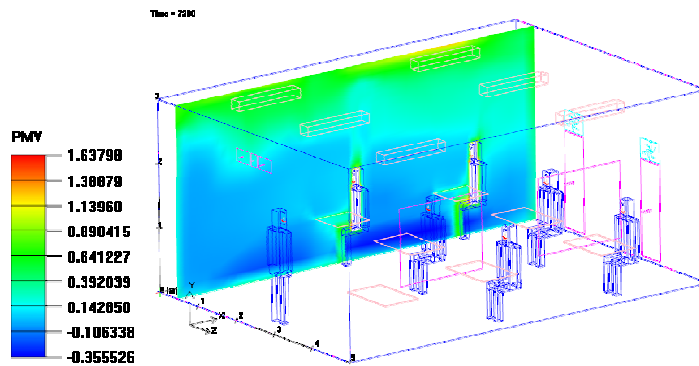


Figura 4.74: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=0.47$ ).

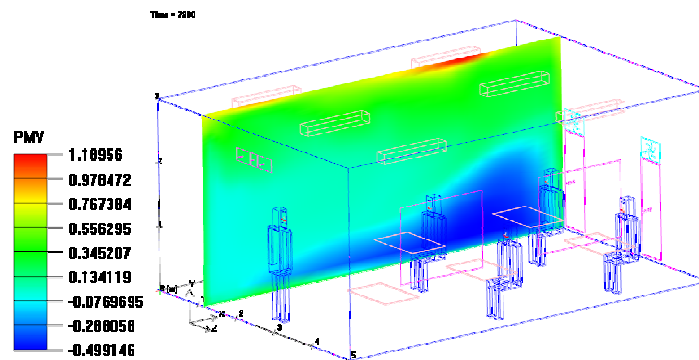


Figura 4.75: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=1.165$ ).

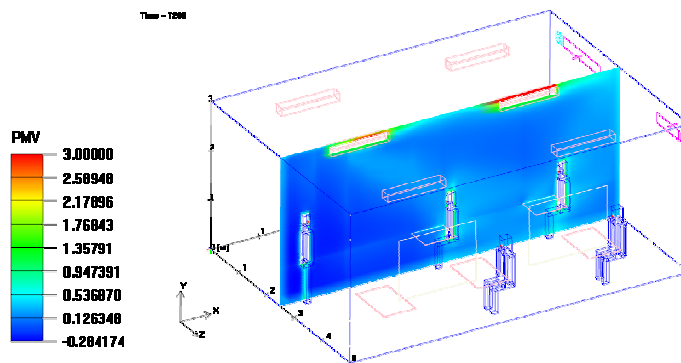


Figura 4.76: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $y=2.5$ ).

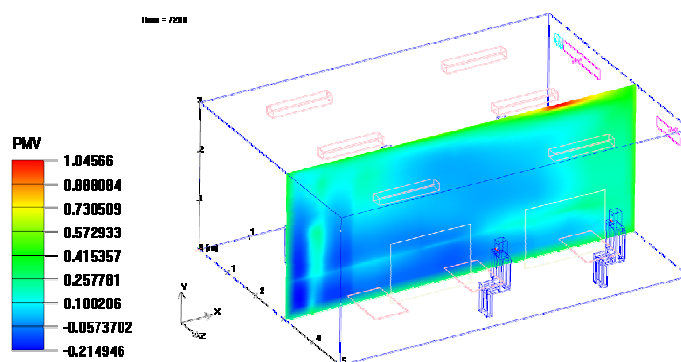


Figura 4.77: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método mistura no plano de corte XY ( $y=3.07$ ).

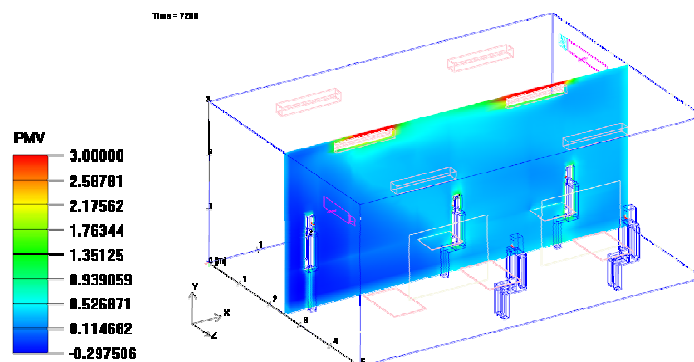


Figura 4.78: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=2.5$ ).

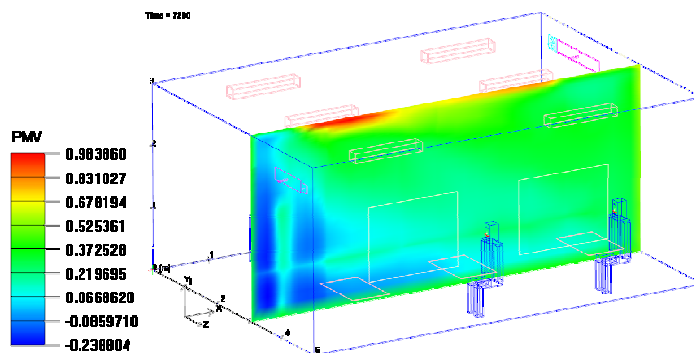


Figura 4.79: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método cruzado no plano de corte XY ( $y=3.07$ ).

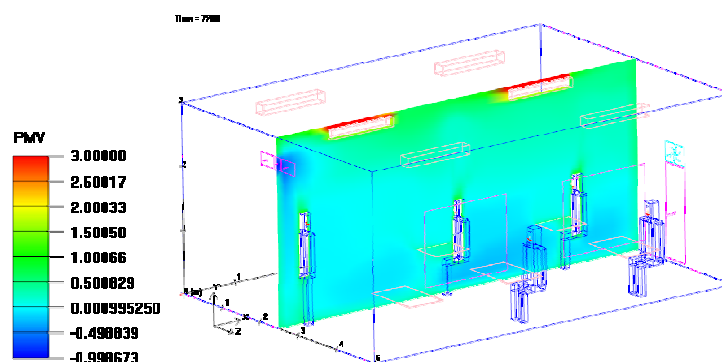


Figura 4.80: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=2.5$ ).

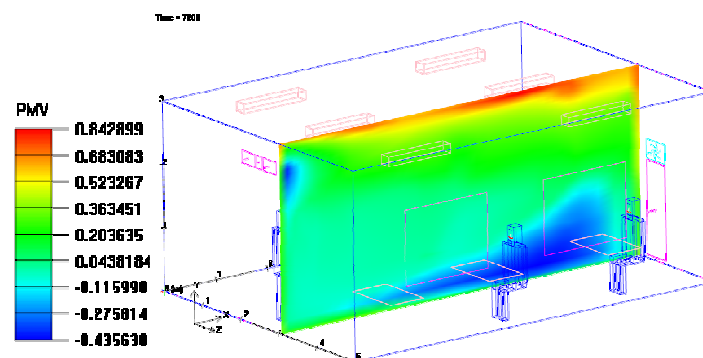


Figura 4.81: Campo de distribuição do índice PMV do tipo de ventilação  $\gamma$  para o método deslocamento no plano de corte XY ( $y=3.07$ ).

### **Assimetria vertical $\alpha$**

A ISO 7730:1994 [57] considera um ambiente termicamente aceitável, quando mais de 10% dos ocupantes não se sintam insatisfeitos. Nesta secção são apresentados os gráficos de evolução do índice PMV e PPD para o método de mistura, cruzado e deslocamento, nos pontos de medição definidos na Tabela 4.1, a cerca de 1.3 metros de distância dos ocupantes

de pé conforme [62], podendo ser visualizados na Figura 4.5. Efectua-se uma análise vertical ao índice PPD, avaliando o grau de insatisfação em cada ponto de medição.

A Figura 4.82 e Figura 4.84, associada respectivamente ao método mistura e cruzado, representa a evolução do índice PMV compreendido nos valores limites aceitáveis de conforto térmico na zona de ocupação. Verifica-se no gráfico (Ventilação  $\alpha$  central), numa análise do Ocup1, um pico a cerca de 2.8 metros com um índice PMV de sensação térmica 3 (Muito quente), representando a potência térmica da iluminação do tecto, dissipada sob a forma de calor. No gráfico (Ventilação  $\alpha$  lateral) verifica-se na evolução do Ocup2, a cerca de 2.7 m de altura uma redução do índice PMV para o valor de -1 (Ligeiramente frio) devido à passagem do fluxo de ar de insuflação (ver Figura 4.31). A Figura 4.83 e Figura 4.85 evidenciam para o método de mistura no plano central uma avaliação vertical enquadrada nos limites máximos aceitáveis de satisfação, considerando o valor de 9% de insatisfeitos. Embora excluídos da zona de ocupação e do interesse do estudo, verifica-se a cerca de 2.8 m de altura para o Ocup1 no gráfico (Ventilação  $\alpha$  central), um grau de insatisfação de 100% correspondendo à iluminação do tecto. A análise dessa situação resulta na insatisfação completa de todos os ocupantes que estivessem sujeito a um ambiente térmico dessa natureza. A análise efectuada face ao gráfico (Ventilação  $\alpha$  lateral), na evolução do Ocup2, a cerca de 2.7 m de altura resulta num grau de insatisfação de cerca de 20% dos ocupantes que estivessem sujeitos a essas condições térmicas.

A Figura 4.86 representa o método de deslocamento, com uma evolução vertical do índice de PMV com proximidade ao valor 0.5 a cerca de 2 m de altura, devido ao gradiente térmico ascendente fomentado por este método de ventilação. A Figura 4.87 apresenta analogamente a percentagem de pessoas insatisfeitas sujeitas a um ambiente térmico dessa natureza, resultando num valor máximo de 5%.

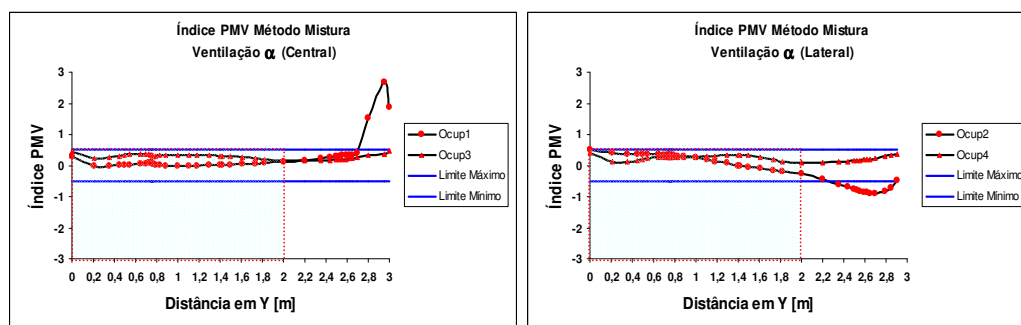


Figura 4.82: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\alpha$ .

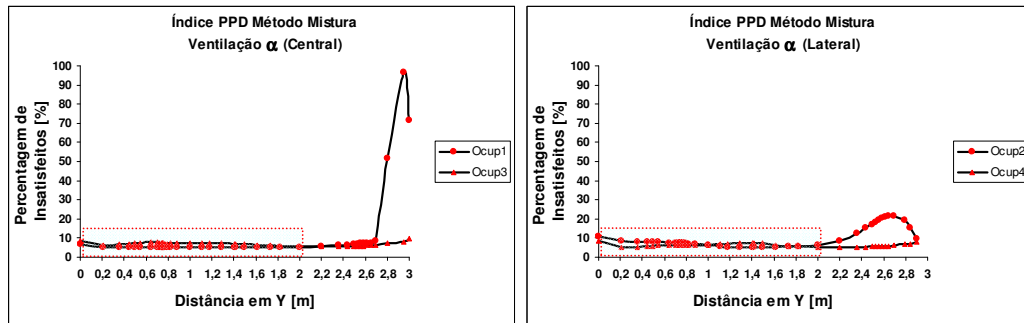


Figura 4.83: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\alpha$ .

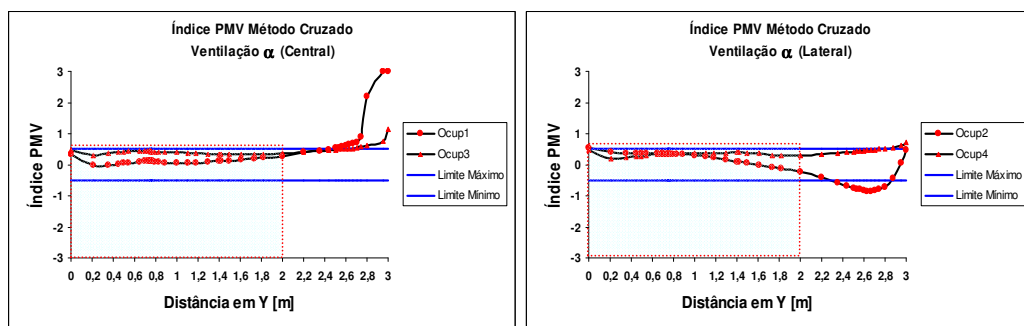


Figura 4.84: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\alpha$ .

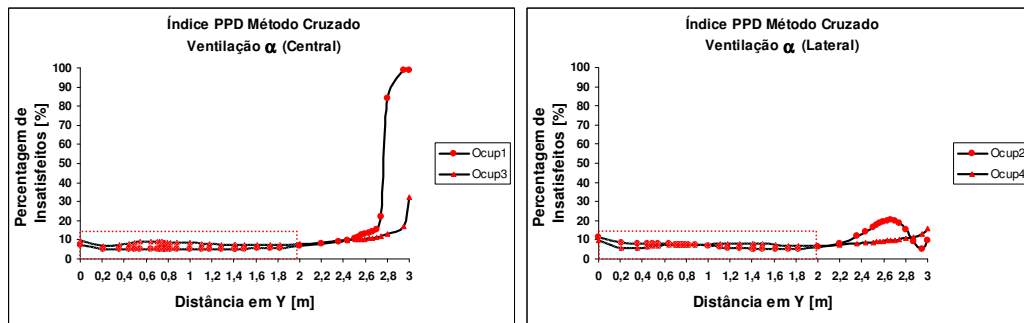


Figura 4.85: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\alpha$ .

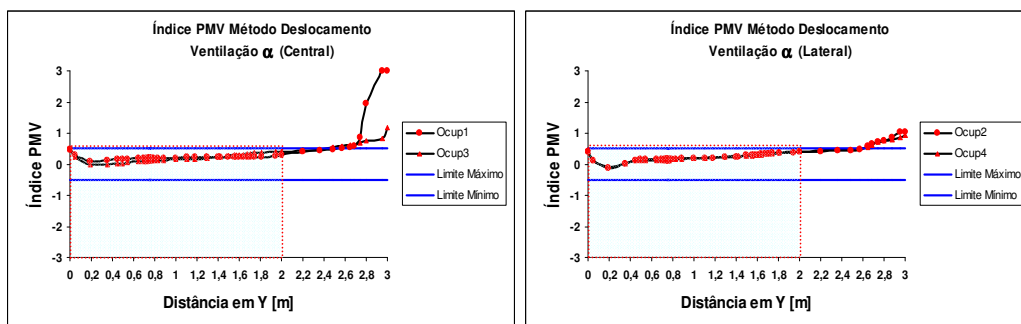


Figura 4.86: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\alpha$ .

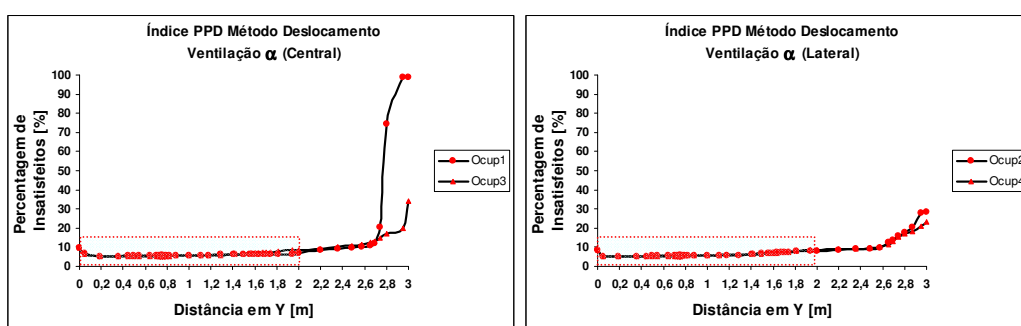


Figura 4.87: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\alpha$ .

### **Assimetria vertical $\gamma$**

Nesta secção apresenta-se a evolução do índice PMV e PPD considerando o método  $\gamma$ . Destaca-se na zona de ocupação da Figura 4.88 e Figura 4.89, um comportamento vertical aproximadamente idêntico aos gráficos homólogos da Figura 4.82 e Figura 4.83 para o método de mistura. Verifica-se no entanto no gráfico (Ventilação  $\gamma$  lateral) a uma altura de 2.8 m, um ponto de inflexão mais acentuado correspondendo a um índice PMV de -1.3, com tradução de uma percentagem de insatisfeitos em cerca de 30%, caso os ocupantes estivessem sujeitos às condições térmicas referidas.

A Figura 4.90 e Figura 4.91 representa o método cruzado, que comparado com o método mistura apresenta algumas melhorias, embora irrelevantes dado ocorreram acima da zona de ocupação. Destaca-se a cerca de 2.8 m de altura uma redução do índice PMV de 3 para 1.6, garantindo apenas 30% de satisfeitos.

A Figura 4.92 e Figura 4.93 no que respeita ao método deslocamento apresentam um comportamento vertical idêntico ao nível do índice PMV e grau de pessoas insatisfeitas ao verificado nos gráficos homólogos do método  $\alpha$ .

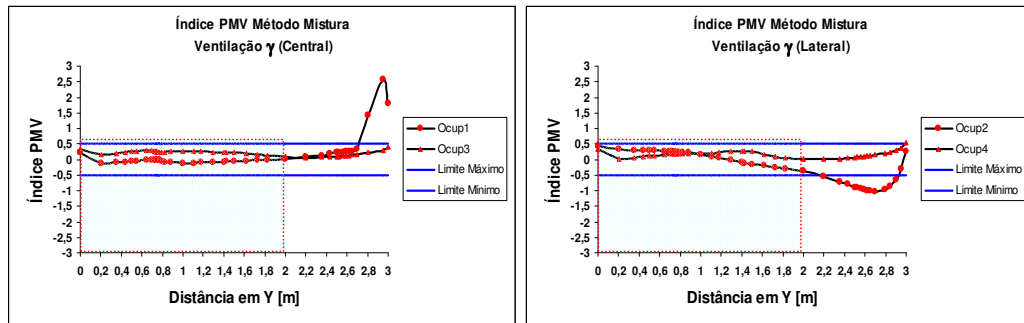


Figura 4.88: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\gamma$ .

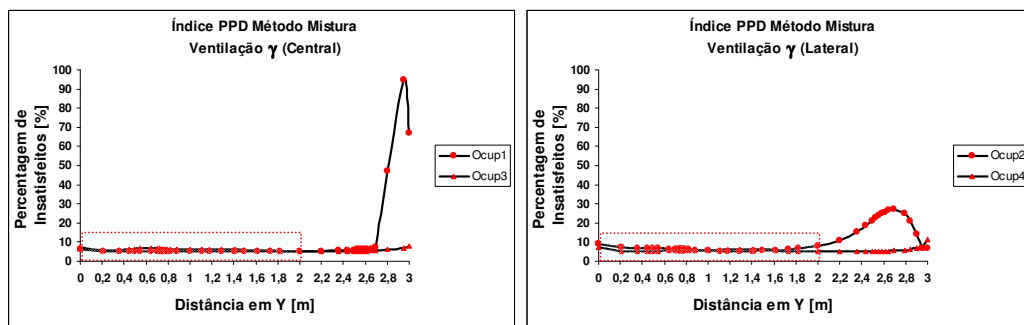


Figura 4.89: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método mistura da ventilação  $\gamma$ .

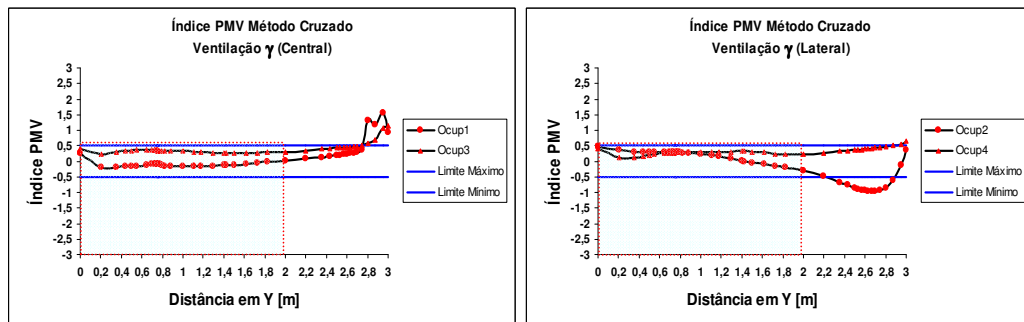


Figura 4.90: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\gamma$ .

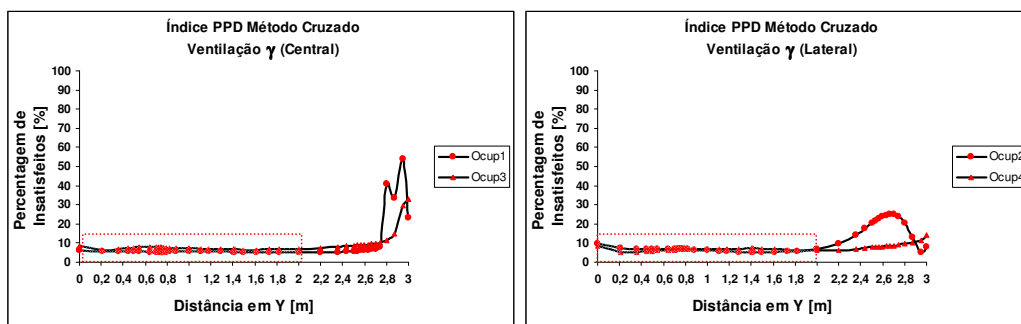


Figura 4.91: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método cruzado da ventilação  $\gamma$ .

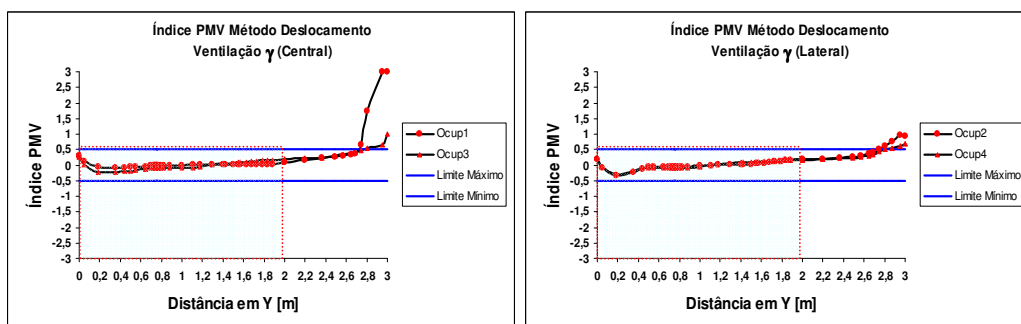


Figura 4.92: Evolução do índice PMV num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\gamma$ .

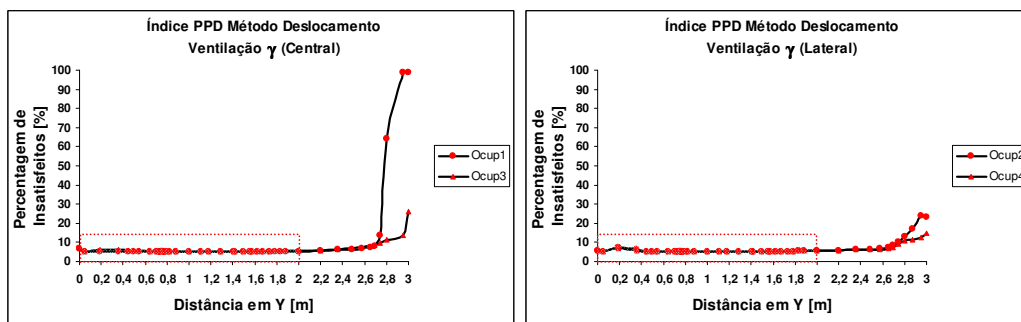


Figura 4.93: Evolução do índice PPD num perfil vertical nos pontos de medição para o método deslocamento da ventilação  $\gamma$ .

## 4.3 Conclusões

Em consonância com a ISO 7730:1994 [57], efectua-se a título conclusivo uma análise global da qualidade do ar e conforto térmico interior para o método mistura, cruzado e deslocamento. Verifica-se que no mínimo, cerca de 90% dos ocupantes do espaço encontram-se satisfeitos termicamente. Através de uma análise qualitativa da velocidade do ar, verifica-se baseado na Figura 4.37 que eventualmente o ocupante de pé poderá apresentar desconforto



térmico derivado da proximidade de uma velocidade do ar de 0.32 m/s, validando os valores de PMV e PPD obtidos numericamente com 10% de ocupantes insatisfeitos. De todos os métodos de ventilação em estudo, apenas no método de deslocamento é possível verificar o cumprimento regulamentar da velocidade máxima de ar de 0.2 m/s em toda a plenitude da zona ocupada, derivado de uma baixa velocidade do ar de insuflação e estratificação da concentração de CO<sub>2</sub> acima da zona ocupada, fomentada por uma exaustão e retorno a esse nível.

De forma a avaliar a assertividade dos valores de eficácia de ventilação estipulados na prENV1752:1997 [13], na ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e RSECE [3], na sua aplicação à simulação numérica, apresenta-se na Tabela 4.6 a determinação das quantidades mínimas de ar novo para cada uma das normas e regulamento, e posteriormente a afectação da eficácia de ventilação na Tabela 4.7 com os valores obtidos da Tabela 2.3 e Tabela 2.4.

Verifica-se na Tabela 4.6 uma divergência nos caudais mínimos de ar novo associados a cada uma das normas e regulamento, pelo que a prENV1752:1997 [13] dada a sua antiguidade contempla a possibilidade dos espaços a climatizar serem sujeitos a uma geração de contaminantes como fumo de tabaco, resultando num caudal mínimo por ocupante mais elevado. A ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] reflecte os benefícios de uma experiência e investigação ao longo de vários anos no âmbito da qualidade do ar interior, apresentando permissividade da utilização de uma determinada quantidade de ar novo, caso o projectista apresente uma validação de que os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> se encontram abaixo dos valores recomendados. A redução dos caudais de ar novo é baseada inclusive na consideração de espaços ocupados não fumadores. A determinação da quantidade mínima de ar novo considera a introdução de dois termos na sua equação (ver equação 1.2), ponderando a probabilidade de uma ocupação máxima através da componente da densidade ocupacional e da componente da área útil ocupada. O RSECE [3] como regulamento aplicável sob jurisdição portuguesa adopta um valor de caudal mínimo de ar novo intermédio entre as duas normas abordadas anteriormente.

A Tabela 4.7 apresenta valores idênticos para o método de deslocamento entre a ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e a prENV1752:1997 [13], pelo que embora as duas normas considerem a influência do gradiente térmico vertical na obtenção da eficácia de ventilação, a prENV1752:1997 [13] é mais detalhada na escala de gradientes de temperatura e correspondência à eficácia de ventilação. Como através da análise da Figura 4.63 verifica-se um gradiente térmico vertical na zona ocupada de cerca de 3 °C, mediante a Tabela 2.3, obtém-se um valor de eficácia de ventilação interpolado de 1.3, enquanto na ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] é definido um valor de 1.2 caso a insuflação ocorra no solo e o retorno no tecto, garantindo uma ventilação por deslocamento de baixa velocidade num sentido unidireccional, com estratificação térmica.

Verifica-se através da Tabela 4.8 os resultados das simulações numéricas face ao método  $\gamma$ , apresentando-se os valores de caudal mínimo de ar novo agravado a considerar, garantindo

um nível de concentração de  $\text{CO}_2$  em qualquer ponto de medição da zona ocupada inferior ao valor regulamentar de 1000 ppm [3].

As simulações numéricas dos diversos métodos de ventilação para o método  $\gamma$  contemplam a contribuição do ar novo de acordo com o valor regulamentar definido no RSECE [3], no entanto verifica-se que para o método de mistura e cruzado necessitam de um valor de 228  $\text{m}^3/\text{h}$ , contra os 252  $\text{m}^3/\text{h}$  requeridos pela ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e os 262.5  $\text{m}^3/\text{h}$  requeridos pelo RSECE [3] (com a eficácia de ventilação obtida da prENV1752:1997 [13]). Conclui-se respectivamente que a simulação numérica permite uma redução do caudal de ar novo, respectivamente em 10.3% e 13.9%. Os valores definidos na ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] são os que mais se aproximam dos resultados obtidos das simulações numéricas do método  $\gamma$ , devendo por defeito ser considerado a aplicação desta norma no projecto, caso se considere o método de ventilação por mistura ou cruzado. No método de ventilação de deslocamento, o resultado da simulação numérica para o método de ventilação  $\gamma$ , apresenta um valor de 420  $\text{m}^3/\text{h}$  dado ser considerado uma eficácia de ventilação de 0.5 de forma a cumprir o valor de pico máximo de concentração de  $\text{CO}_2$  de 1000 ppm. Em comparação ao valor de caudal mínimo de ar novo definido no regulamento do RSECE [3], com afectação do valor de eficácia de ventilação da prENV1752:1997 [13], o valor obtido da simulação numérica difere de 162  $\text{m}^3/\text{h}$ , conforme enunciado na Tabela 4.7.

Uma análise cirúrgica à Tabela 4.8 permite concluir que os caudais mínimos de ar novo contemplados no RSECE [3] sem afectação do valor de eficácia de ventilação, não são suficientes para garantir os níveis máximos de concentração de  $\text{CO}_2$  em 1000 ppm na zona de ocupação. O método por deslocamento apresenta contudo o valor de pico de concentração mais elevado, no entanto o seu valor médio na zona de ocupação corresponde ao valor mais baixo atingido. Este fenómeno comportamental é promovido pela estratificação de níveis elevados de concentração de  $\text{CO}_2$  acima da zona de ocupação, derivado de uma insuflação ao nível da zona de ocupação e uma extracção acima da zona de ocupação.

A simulação numérica do método de deslocamento é efectuada com um valor de eficácia de ventilação de 0.5, verificando-se através da Tabela 4.8 a única forma do cumprimento regulamentar do pico de concentração de  $\text{CO}_2$  em cerca de 999 ppm.

Tabela 4.6: Determinação das quantidades mínimas de ar novo em conformidade com as normas e regulamento (parte extraída de [3], [9], [13]).

Âmbito de Aplicação		Tipo de Aplicação (Sala de aula)	$V_{resp}$ [l/s] / [m³/h]
Normas	prENV1752:1997	$q_v = 5 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ Ocupação [pessoa/ m²] = 0.5 Nº Pessoas: 7	70 / 252
	ASHRAE Standard 62.1:2004	$V_{resp} = R_p P_z + R_A A_z \text{ (1.2)}$ $R_p = 5 \text{ l/s} \cdot \text{pessoa}$ $P_z = 7 \text{ pessoas}$ $R_A = 0.6 \text{ l/s} \cdot \text{pessoa}$ $A_z = 35 \text{ m}^2$	56 / 201.6
Regulamento	RSECE	$q_v = 30 \text{ m}^3 / \text{h}$	58.3 / 210

Tabela 4.7: Apresentação dos valores do caudal de ar novo com aplicação da eficácia de ventilação de acordo com as normas e regulamento (parte extraída de [9], [13]).

Âmbito de Aplicação	Normas					Regulamento	
	prENV1752:1997			ASHRAE Standard 62.1:2004		RSECE	
Tipo de Ventilação	$\varepsilon_v$	$q_v / \varepsilon_v$ [m³/h]	$\Delta T$ (sala-Insuf.) [°C]	$\varepsilon_v$	$V_{resp} / \varepsilon_v$ [m³/h]	$\varepsilon_v$	$q_v / \varepsilon_v$ [m³/h]
Mistura	0.8	315	3.12	0.8	252	0.8	262.5
Cruzado	0.8	315	3.55	0.8	252	0.8	262.5
Deslocamento	1.3	194	3.23	1.2	168	1.3	162

Tabela 4.8: Apresentação dos resultados de eficácia de ventilação obtidos das simulações numéricas de acordo com os caudais volúmicos do RSECE.

Eficácia de Ventilação obtida por simulação numérica	Método de Ventilação		
	Mistura	Cruzado	Deslocamento
$q_v$ [m³/h]	210	210	210
$\varepsilon_v$	0.92	0.92	0.5
(Continua na página seguinte)			

Eficácia de Ventilação obtida por simulação numérica	Método de Ventilação		
	Mistura	Cruzado	Deslocamento
$\frac{q_v}{\varepsilon_v}$ [m³/h]	228	228	420
<b>Concentração CO<sub>2</sub> Método <math>\alpha</math></b> <b>(Média/ Max) [ppm]</b>	979 / 1034	1022 / 1093	812 / 1174
<b>Concentração CO<sub>2</sub> Método <math>\gamma</math></b> <b>(Média/ Max) [ppm]</b>	858 / 910	901 / 968	724 / 999

Efectua-se uma simulação numérica do método de ventilação de deslocamento associado ao método  $\gamma$ , com aplicação directa do caudais mínimos de ar novo da ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] com eficácia de ventilação de 1.2 no sentido de avaliar os resultados obtidos. A consideração para o método de mistura e cruzado de um caudal de ar novo superior ao estabelecido na Tabela 4.9 não traz valor acrescentado, pois com os actuais valores de caudais obtidos, efectivamente são cumpridos os critérios regulamentares de concentração máxima de CO<sub>2</sub>.

Relativamente ao método de deslocamento através da Tabela 4.9 verifica-se que com a aplicação dos valores de eficácia de ventilação definidos quer no RSECE [3], quer na ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] o valor de pico de concentração de CO<sub>2</sub> ultrapassa o critério regulamentar em cerca de 1105 ppm, no entanto em valor médio na zona de ocupação é apresentado um valor de 777 ppm.

A conclusão imediata resulta da necessidade de se ter algum cuidado na forma de efectuar projecto com o método deslocamento, podendo existir picos de concentração de CO<sub>2</sub> localizados mesmo mantendo uma eficácia de ventilação adoptada quer do RSECE [3], quer da ASHRAE Standard 62.1:2004 [9]. Desta forma eleva-se a importância da utilização de uma ferramenta de simulação numérica no sentido de identificar e corrigir eventuais picos de concentração de CO<sub>2</sub> que de outra forma não seria possível de identificar.

Tabela 4.9: Apresentação dos resultados de eficácia de ventilação obtidos das simulações numéricas com aplicação da ASHRAE Standard 62.1:2004 para o método  $\gamma$ .

Eficácia de Ventilação obtida por simulação numérica	Método de Ventilação $\gamma$		
	Mistura	Cruzado	Deslocamento
$V_{resp}$ [m <sup>3</sup> /h]	201.6	201.6	201.6
$\varepsilon_v$	0.8	0.8	1.2
$V_{resp} / \varepsilon_v$ [m <sup>3</sup> /h]	252	252	168
Concentração CO <sub>2</sub> (Média/ Max) [ppm]	-	-	777/1105

Verifica-se através da Tabela 4.10, a aplicação da equação (2.82) para a determinação da eficácia de ventilação do método  $\gamma$  através da concentração de CO<sub>2</sub>. Verifica-se a validação dos valores de eficácia de ventilação obtidos na Tabela 4.8, com convergência numérica à Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Apresentação dos resultados de eficácia de ventilação obtidos das simulações numéricas comparativamente aos valores da prENV1752:1997.

Método Ventilação	C <sub>s</sub> [CO <sub>2</sub> ] Insuflação [ppm]	C <sub>ext</sub> [CO <sub>2</sub> ] Exaustão [ppm]	C <sub>i</sub> [CO <sub>2</sub> ] Respiração [ppm]	$\varepsilon_v$ prENV1752:1997 $\varepsilon_v = \frac{C_{ext} - C_s}{C_i - C_s} \quad (2.82)$
Mistura	527.44	876.00	911.82	0.91
Cruzado	541.15	903.43	946.41	0.89
Deslocamento	518.17	764.19	999.71	0.51



## 5 Conclusões

O trabalho de simulação numérica apresentado permitiu estudar as técnicas e métodos que em condições experimentais seriam economicamente ou temporalmente inoportunos ou desvantajosas.

A tese apresentou como pretensão principal, a comparação dos valores de eficácia de ventilação obtidos numericamente para os métodos de ventilação de mistura, cruzado e deslocamento, com os valores tabelados da prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9]. Como alvo de estudo paralelo pretendeu-se analisar os resultados numéricos do campo de contorno e vectorial de velocidade do ar para avaliação do cumprimento regulamentar do RSECE [3] da velocidade máxima de 0.2 m/s. Ao nível do RSECE pretendeu-se analisar o campo de distribuição de temperatura do ar para a verificação das condições interiores de referência de 25 °C e a verificação do valor limite de 0.2 m/s de velocidade do ar na zona ocupada. No âmbito do conforto térmico, pretendeu-se analisar os critérios da ISO 7730:1994 [57] relativamente a uma assimetria da temperatura radiante de janelas com valores inferiores a 35 °C (em relação a um plano vertical 0.6 m), uma diferença de temperatura do ar a 1.1 m e a 0.1 m acima do chão inferior a 4°C, e uma análise global aos campos de índice de conforto térmico PMV. O resultado prático converge na selecção de um método de ventilação que consolida a exigência dos critérios requeridos para a qualidade e conforto térmico interior, optimizando as condições e as especificações de funcionamento dos elementos de difusão terminais. Apresenta-se nesta secção as conclusões finais obtidas após os objectivos alcançados.

O recurso de um modelo numérico de cálculo computacional de dinâmica dos fluidos como o *indoor zero equation* permitiu o estudo de diversas técnicas de ventilação, contribuindo com uma rápida previsão do escoamento, transporte de espécies, e garantia de elevado grau de confiança nos resultados obtidos. Outros modelos numéricos foram contudo alvo de revisão bibliográfica, no entanto factores como o elevado tempo de cálculo e a necessidade de recursos computacionais mais avançados determinaram a decisão do modelo numérico *indoor zero equation*.

No âmbito dos critérios de selecção das malhas a adoptar, destaca-se o recurso aos métodos multi-malha, nomeadamente o V e o Flex, com a vantagem de acelerar a convergência da solução através do cálculo das correcções numa série de níveis de refinação de malhas. A recorrência a este método permitiu reduzir drasticamente o número de iterações e o tempo requerido de computação para obter a solução convergida.

A modelação propositada de uma grelha de insuflação de ar novo independente da grelha de insuflação do ar de retorno permitiu a simulação de diferentes caudais de ar novo e testar diferentes localizações, que embora não tenham sido alvo de referência na tese, foram efectivadas em estudos paralelos no sentido de avaliar a sua influência no comportamento do

escoamento do ar, e consequente influência na distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  no volume da sala de aula. Por outro lado a existência de “blocos” repartidos permite uma maior flexibilidade na criação de sistemas de climatização para outros estudos a desenvolver futuramente.

O recurso analítico da equação de diluição permitiu previamente calibrar o nosso modelo numérico em CFD, correlacionado iterativamente a geração de espécie de  $\text{CO}_2$  com o volume de controlo de geração. Desta forma pretendeu-se prever a taxa de libertação de  $\text{CO}_2$  para cada ocupante num regime transiente, com limite de 7500 segundos, em conformidade com a convergência do valor do pico de concentração de  $\text{CO}_2$  do resultado numérico com a equação de diluição, verificado na Tabela 3.5. O erro inferido na consideração da equação de diluição (homogeneização da concentração de  $\text{CO}_2$  por todo o volume) como base para a calibração do modelo numérico na geração de  $\text{CO}_2$  numa análise à concentração máxima de  $\text{CO}_2$  atingida na zona de ocupação, é minimizado através da consideração do caudal mínimo de ar novo suficiente para a redução dos picos de concentração de  $\text{CO}_2$  para os valores regulamentares de 1000 ppm.

A utilização do valor de concentração de uma espécie como o  $\text{CO}_2$  na indicação da qualidade do ar interior é validada apenas, quando a geração de outros poluentes é igualmente proporcional ao nível de ocupação. No caso de estudo apenas é considerado a única fonte de geração o  $\text{CO}_2$ , não sendo considerado a libertação de partículas e/ou COV's libertados pelos materiais que revestem a sala de aula, pelo que desta forma a qualidade de ar interior é fortemente correlacionada com os valores de concentração de  $\text{CO}_2$  obtidos.

Conclui-se que os valores de caudal mínimo de ar novo estipulados no RSECE [3], sem afectação da eficácia de ventilação não são suficientes para reduzir os picos de concentração de  $\text{CO}_2$  para valores regulamentares do RSECE [3].

A optimização do ângulo de insuflação não constitui por si só uma solução para a redução dos picos de concentração de  $\text{CO}_2$  para o valor regulamentar do RSECE [3] em 1000 ppm, sendo necessário considerar uma eficácia de ventilação através do incremento do caudal mínimo de ar novo.

O método deslocamento apresenta as melhores condições para a garantia de uma qualidade do ar interior e conforto térmico, derivado de um menor tempo de residência do ar na zona de ocupação. Verifica-se uma estagnação do ar vertical para os métodos mistura e cruzado afectando a zona de respiração e uma estagnação do ar horizontal no método de deslocamento com maior concentração acima da zona de ocupação. Verifica-se para o método de deslocamento que os valores de maior concentração de  $\text{CO}_2$  atingidos encontram-se acima da zona de ocupação. Verifica-se o contributo do método de deslocamento como catalisador da estratificação do ar, favorecendo a qualidade do ar na zona que se pretende garantir, correspondendo à zona de ocupação.



A verificação de uma velocidade do ar superior a 0.2 m/s na zona de ocupação apresenta uma dualidade negativa ao nível do conforto térmico e do arrastamento potencial de partículas, constituindo um problema acrescido em termos de QAI. Os resultados numéricos permitem aferir a extrema dificuldade no cumprimento do valor regulamentar da velocidade do ar de 0.2 m/s no método de mistura e cruzado ao nível da cabeça do 1º ocupante sentado e no ocupante de pé com proximidade ao ponto de decaimento do ar de insuflação, no entanto verifica-se na restante zona ocupada o seu cumprimento regulamentar. O método de deslocamento surge como o único método que cumpre na plenitude da zona ocupada, o valor de velocidade de ar requerido, devido às baixas velocidades de insuflação.

Conclui-se que o modelo numérico produz resultados satisfatórios ao nível da eficácia de ventilação após validação com a prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9], constituindo uma ferramenta muito importante no estudo de métodos de ventilação e condições de funcionamento para garantia da qualidade de ar interior. As simulações dos diversos métodos de ventilação contemplam a contribuição do ar novo de acordo com o valor regulamentar definido no RSECE [3], no entanto verifica-se que as simulações numéricas dos métodos de mistura e cruzado traduzem uma eficácia de ventilação de 0.92, necessitando de menor caudal mínimo de ar novo em cerca de 10.3% face à ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e 13.9% face ao RSECE [3] com os valores de eficácia de ventilação da prENV1752:1997 [13]. A ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] é a norma que melhor se enquadra nos resultados obtidos das simulações numéricas, devendo por defeito ser considerado no projecto, caso se considere o método de ventilação por mistura ou cruzado.

Relativamente ao método de deslocamento, embora a ASHRAE Standard 62.1:2004 [9] e a prENV1752:1997 [13] considerem a influência do gradiente térmico vertical na obtenção da eficácia de ventilação, a prENV1752:1997 [13] é mais detalhada na escala de gradientes de temperatura com correspondência à eficácia de ventilação. Em concordância com a prENV1752:1997 [13] verifica-se um gradiente térmico vertical na zona ocupada de cerca de 3 °C, obtendo-se um valor de eficácia de ventilação interpolado de 1.3 através da Tabela 2.3. Através da Tabela 2.4, verifica-se um valor aproximadamente idêntico de 1.2 considerando a ASHRAE Standard 62.1:2004 [9].

No âmbito do método de deslocamento para o método  $\gamma$ , a simulação numérica premeditou um valor de eficácia de ventilação de 0.5 forçosamente diferente dos valores predefinidos de 1.3 e 1.2 respectivamente na prENV1752:1997 [13] e ASHRAE Standard 62.1:2004 [9]. A razão principal do diferencial prende-se com a necessidade de garantir na simulação numérica um pico máximo de concentração de CO<sub>2</sub> inferior ao critério regulamentar de 1000 ppm, perfazendo neste caso um valor de 999 ppm. Numa simulação numérica adoptando o valor de eficácia de ventilação padronizado em cerca de 1.2 para o método de deslocamento conforme a ASHRAE Standard 62.1:2004 [9], verifica-se alguma dificuldade no cumprimento do valor de pico máximo de concentração de CO<sub>2</sub> para o valor regulamentar ao nível da zona ocupada, perfazendo um numerário de 1105 ppm. Verifica-se no entanto um valor médio de

concentração de CO<sub>2</sub> na zona ocupada em cerca de 777 ppm, cumprindo largamente as exigências regulamentares de limite máximo de concentração de CO<sub>2</sub>. O método por deslocamento no tipo de ventilação  $\alpha$  apresenta contudo o valor de pico mais elevado, no entanto o seu valor médio corresponde ao valor de nível de concentração mais baixo, correspondendo ao fenómeno comportamental de estratificação de concentrações de CO<sub>2</sub>.

De uma forma conclusiva, o método de ventilação por deslocamento apresenta enorme vantagem ao nível da poupança energética e dos requisitos da QAI face aos restantes métodos cruzado e mistura. O resultado é demonstrado numa menor quantidade de caudal de ar novo para a garantia do menor valor médio de concentração de CO<sub>2</sub> na zona ocupada, dentro do critério regulamentar máximo de 1000 ppm. O método deslocamento quando analisado com os valores de eficácia de ventilação do RSECE [3] ou prENV1752:1997 [13] em valor médio de concentração de CO<sub>2</sub> na zona ocupada apresenta forte correlação com a realidade, garantindo o critério regulamentar de concentração máxima de 1000 ppm, no entanto não possibilita a localização e quantificação de valores de focos de concentração de CO<sub>2</sub> que poderão surgir fora do limite regulamentar.

Dado não existir outra forma possível de detectar os picos de concentração de CO<sub>2</sub>, o estudo do método de deslocamento deve ser acompanhado e verificado por ferramentas de simulação CFD para identificação, quantificação, correcção dos pontos críticos e garantia que determinados locais não ultrapassem os valores de pico de concentração máxima, caso contrário pode existir um elevado risco para a concepção de um mau projecto.

O método de deslocamento tem que ser muito bem projectado ao nível da distribuição do caudal de ar novo, caso contrário podem repercutir focos de concentração de CO<sub>2</sub> muito elevados em determinados pontos da zona de ocupação, não cumprindo os critérios regulamentares com o valor máximo de concentração máxima de 1000 ppm. Em [45] revela-se *“No método deslocamento, a localização e distribuição dos difusores de insuflação é essencial para enfatizar a eficácia de ventilação”*, demonstrando uma vez mais a extrema importância na utilização de ferramentas como o CFD para avaliação do funcionamento do método de ventilação para a garantia da qualidade do ar e conforto térmico.

Em consonância com a ISO 7730:1994 [57], efectua-se a título conclusivo uma análise global da qualidade do ar e conforto térmico interior para o método mistura, cruzado e deslocamento. Verifica-se que no mínimo 90% dos ocupantes do espaço encontram-se satisfeitos termicamente.

A análise CFD permitiu através dos resultados de distribuição de temperatura do ar e trajectória do escoamento do ar, verificar que o posicionamento do termostato no espaço tem um interesse fulcral no conforto térmico e no consumo energético associado ao tempo de funcionamento da unidade de climatização para vencer a carga térmica do espaço.

A colocação do termostato próximo da insuflação leva a que o “setpoint” seja atingido sem garantia de conforto térmico noutras zonas. A sua colocação fora da zona de insuflação e

ocupação leva a que se atinja o “setpoint” demasiado tarde, provocando um arrefecimento excessivo na zona de insuflação. A definição da temperatura de “setpoint” é igualmente importante na contabilização dos consumos energéticos, dado que uma temperatura requerida inferior, origina uma necessidade de arrefecimento mais elevada, com o aumento do caudal volúmico de ar ou do tempo de funcionamento até a unidade desligar por termostato.

Dado no método mistura e cruzado ocorrer uma uniformização da temperatura por toda a zona ocupada, o termostato deverá ser localizado de acordo com as exigências anteriormente enunciadas. No método deslocamento verifica-se uma variação do gradiente térmico vertical e horizontal do ar, pelo que em conformidade com a Figura 4.57, é importante definir a localização do termostato a uma altura máxima de 1.2 metros, correspondendo à altura máxima até que permanece uma uniformização da temperatura do ar. Para um correcto conforto térmico deverá ser colocado um termostato com um valor de 22 °C próximo da zona do ocupante de pé e cerca de 24 °C perto dos ocupantes sentados da 2ª fila de acordo com a Figura 4.51. A poupança de energia associada ao manuseamento dos termostatos só se torna exequível quando incutido aos utilizadores ou operadores dos sistemas de AVAC, os princípios e metodologias de manuseamento e controlo dos sistemas de climatização para redução dos consumos energéticos.

Através da análise dos campos de distribuição de temperatura do ar, conclui-se no âmbito da validação das condições iniciais previstas de insuflação de ar novo, com o valor de 16°C para o método cruzado e mistura e 22 °C para método deslocamento aliado ao caudal volúmico de ar, que o balanço térmico é garantido com o cumprimento das exigências de carga térmica interior. São igualmente garantidas as exigências de gradiente térmico vertical máximo inferior a 4º C da ISO 7730:1994 [57] e o nível de conforto térmico desejado. Uma temperatura do ar de insuflação reduzida, necessita de um menor caudal volúmico de ar novo para atingir a temperatura de “setpoint” no entanto provoca uma estratificação da temperatura do ar, impossibilitando a garantia de vencer as cargas térmicas do espaço a climatizar.

O resultado prático na determinação da distribuição da concentração de CO<sub>2</sub> permite no caso da adopção de um sistema VAV (Volume de Ar Variável) saber o posicionamento do sensor de CO<sub>2</sub> de acordo com o layout de ocupação e sistema de climatização, forma a garantir as condições de qualidade ar interior e conforto térmico no âmbito regulamentar. Desta forma seria colocado com proximidade ao ponto de medição correspondente ao pico de concentração de CO<sub>2</sub>.

Como conclusão geral denota-se que a simulação numérica em CFD constitui uma ferramenta para a QAI extremamente útil na avaliação da eficácia das técnicas de ventilação, dando um contributo importante ao projecto no sentido de uma garantia real do cumprimento dos critérios da QAI, aliando o conceito de eficiência energética. Demarca-se uma vantagem integrada no projecto de simulação da QAI, no âmbito da determinação dos caudais de ar novo mínimos para a garantia do cumprimento regulamentar dos picos de concentração de CO<sub>2</sub>, e como uma ferramenta capaz de identificação dos pontos críticos passíveis de serem corrigidos

pelos sistemas de AVAC localmente. As simulações numéricas no domínio da dinâmica de fluidos CFD constituem desta forma uma ferramenta importante e extremamente interessante para o estudo de técnicas de ventilação no entanto deverão ser validados com as condições de simulação, conhecendo-se igualmente as suas limitações.

## 6 Desenvolvimento futuro

Como trabalhos de desenvolvimento e melhorias futuras apresentam-se as seguintes sugestões:

- Refinamento e adaptação de grelhas de modelos comerciais nos modelos em CFD que simulem um comportamento real aproximado.
- Integração de um modelo experimental para validação dos valores obtidos numericamente.
- A modelação de regimes variáveis de ocupação e diferentes locais de ocupação.
- Extrapolação deste modelo para geometrias complexas e integração de outras espécies como geração de partículas, bactérias ou COV's que não dependam linearmente do nível de ocupação.
- Modelação do tempo de decaimento da concentração de CO<sub>2</sub> para um nível de conforto térmico aceitável entre o final de uma aula e o começo da aula seguinte.
- Análise Técnico-Económica da poupança energética relativamente à redução na eficácia de ventilação.



# Bibliografia

- [1] R, Kosonen. and F, Tan., "The effect of perceived indoor air quality on productivity loss", Energy Build, 36: 981-6, Singapore, 2004.
- [2] Sheldon, L., Clayton, A., Jones, B., Keever, J., Perrit, R., Smith, D., Whitaker, D., and Whitmore, R., "Indoor Pollutant Concentrations and Exposures", in Research Triangle Institute Book (ARB contract no: A133-156), California, 1994.
- [3] RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios, Decreto-Lei n.º79/2006 de 4 de Abril, Diário da República — I SÉRIE-A N.º 67, p.2416-2468, 2006.
- [4] Jones, A.P., "Indoor Air Quality and Health", in Atmospheric Environment - Vol. 33, n.º 28, p.4535-4564, Elsevier Science, 1999.
- [5] RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º80/2006 de 4 de Abril, Diário da República — I SÉRIE-A N.º 67, p.2468-2513, 2006.
- [6] ASHRAE Handbook, "Heating Ventilating and Air Conditioning Systems and Equipment", Chapter 24, in Air Cleaners for particulate contaminants, Atlanta, 1996.
- [7] ASHRAE Handbook, "Heating Ventilating and Air Conditioning Systems and Equipment", Chapter 41, in Control of gaseous indoor air contaminants, Atlanta, 1995.
- [8] ASHRAE Handbook Fundamentals, "Air Contaminants", Chapter 12, Atlanta, 1997.
- [9] ASHRAE Standard 62.1:2004, "Ventilation for Acceptable Indoor Air quality", Atlanta, 2004.
- [10] Persily, A. and Dols, W.S., "The relation of CO<sub>2</sub> concentration to office building ventilation", Air Change Rate and Airtightness in Building, ASTM Special Technical Publication 1067, in Sherman, M.H., Ed., American Society for Testing and Materials, p.77-911990, Philadelphia, 1990.
- [11] Garcia, J.M., Coelho, L.M.R., Gouveia, C., Cerdeira., Louro, C., Ferreira, T., Baptista, M.N., "Analyses of human exposure to urban air quality in a children population", Setúbal, 2008.
- [12] Lei do Tabaco, Decreto-Lei n.º73/2007 Diário da República 1.ª série — N.º 156, 14 de Agosto de 2007.

- [13] PrENV 1752:1997, "Ventilation for Buildings. Design Criteria for the indoor environment", in European Committee for standardization CENTC156.WG6/N162, Brussels, 1997.
- [14] Beck, E.M., "Filters facts", in Indoor Air'90 Toronto, Vol.3, p.171-176, Canada, 1990.
- [15] CEN-EN779, "Particulate air filters for general ventilation requirements- Requirements", Brussels, Belgium, 1994.
- [16] CEN-EN1822, "High efficiency air filters (HEPA and ULPA)", Brussels, Belgium, 1998.
- [17] CEN-EN779."Particulate air filters for general ventilation requirements- Requirements", Brussels, Belgium, 2002.
- [18] EN13779:2007, "Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room conditioning systems", in CEN, 2007.
- [19] Nielson, P.V., "Flow in air conditioned rooms", in Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Denmark, 1976.
- [20] Launder, B.E. and Spalding, D.B., "The numerical computation of turbulent flows", in Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol. 3, p.269-289, 1974.
- [21] Chen, Q., "Comparison of different k- $\epsilon$  models for indoor air-flow computations", in Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals, Vol. 28, p.353-369, 1995.
- [22] Chen, Q., "Prediction of room air motion by Reynolds-stress models", in Building and Environment, Vol. 31, p.233-244, 1996.
- [23] Lam, C.K.G. and Bremhorst, K., "A modified form of the k- $\epsilon$  model for predicting wall turbulence", in Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, Vol. 103, p.456-460, 1981.
- [24] Rodi, W., "Experience with two-layer models combining the k-epsilon model with a one-equation model near the wall", in Proc. of 29th Aerospace Sciences Meeting, Nevada, 1991.
- [25] Kim, S.W. and Chen, C.P., "A multiple-time-scale turbulence model based on variable partitioning of the turbulent kinetic-energy spectrum", in Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals, Vol. 16, p.193-211, 1989.
- [26] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G., in "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", in Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, Vol. 4, p.1510-1520, 1992.
- [27] Gibson, M.M. and Younis, B.A., "Calculation of swirling jets with a Reynolds stress closure", in Physics of Fluids, Vol.29, p.38-48, 1986.



- [28] Malin, M.R. and Younis, B.A., "Calculation of turbulent buoyant plumes with a Reynolds stress and heat-flux transport closure", in *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, p.2247-2264, 1990.
- [29] Launder, H., Moin, P. and Kim, J., "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure", in *J. Fluid Mechanics*, Vol. 68, p.537-566, 1975.
- [30] Emmerich, S.J. and Mcgrattan, K.B., "Application of a large eddy simulation model to study room airflow", in *ASHRAE Transactions*, Vol.104, p.1128-1140, 1998.
- [31] Jiang, Y. and Chen, Q.Y., "Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation", in *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, p.1155-1178, 2001.
- [32] Chen, Q.Y. and Xu, W.R., "A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation", in *Energy and Buildings*, Vol. 28, p.137-144, 1998.
- [33] Zhang, Z., Zhai, J.Z. and Chen, Q., "Evaluation of various CFD models in predicting room airflow and turbulence ", in *Proc. of ROOMVENT 2007*, Helsinki, Finland, 2007.
- [34] Betts, P.L. and Bokhari, I.H., "Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity", in *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, p.675-683, 2000.
- [35] Ito, K., Kato, S. and Murakami, S., "Model experiment of flow and temperature field in room for validating numerical simulation analysis of newly proposed ventilation effectiveness", in *J. Archit. Plan. Environ*, Vol. 534, p.49-56, 2000.
- [36] Blay, D., Mergui, S. and Niculae, C., "Confined turbulent mixed convection in the presence of horizontal buoyant wall jet", in *Fundamentals of Mixed Convection*, Vol. 213, p.65-72, 1992.
- [37] Murakami, S., Kato, S. and Yoshie, R., "Measurement of turbulence statistics in a model fire room by LDV", in *ASHRAE Transactions*, Vol. 101, p.3905, 1995.
- [38] Menter, F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", in *AIAA Journal*, Vol. 32, p.1598-1605, 1994.
- [39] Launder, B.E. and Sharma, B.I., "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc", in *Letters in Heat Mass Transfer*, Vol. 1, p.131-138, 1974.
- [40] Davidson, L.P., Nielsen, V. and Sveningsson, A., "Modification of the v2f model for computing the flow in a 3D wall jet", in *Turbulence Heat and Mass Transfer*, Vol. 4, p.577-584, 2003.
- [41] Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", in *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 3, p.1760-1765, 1991.

- [42] Lilly, D.K., "A proposed modification of the germano subgrid-scale closure model", in *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 4, p.633-635, 1992.
- [43] Shur, M., Spalart, P.R., Strelets, M. and Travin, A., "Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack", in *4th Int. Symposium on Eng. Turb. Modeling and Experiments*, 1999.
- [44] Chou, P.C., Chang, K.F. and Chiang, C.M., "Performances on Indoor Air Quality and Energy Consumption in the Working Spaces using Under-floor Air Distribution (UFAD) System", in *RoomVent 2004, 9th international conference in University of Coimbra*, p .4, Coimbra, Portugal, 2009.
- [45] PIER (Public Interest Energy Research), "Improving Indoor Environmental Quality and Energy Performance of California K-12 Schools in California - Final CFD Analysis and Documentation Report" , California, 2004.
- [46] Srebric, J. and Chen, Q., "Simplified numerical models for complex air supply diffusers", in *HVAC&R Research*, p.277-294, 2002.
- [47] Moser, A, "The Message of Annex 20: Air Flow Patterns within Buildings", in *Proc. 12th AIVC - Air Movement and Ventilation Control within Buildings Conference*, 1991.
- [48] Zhang, J.S., Christianson, L.L., Wu, G.J. and Zhang, R.H., "An experimental evaluation of a numerical simulation model for predicting room air motion", in *Proc. of Jacques Cartier Conference*, 1992.
- [49] Vogel, P., Richter, E. and Rosler, M., "The effect of various inlet conditions on the flow pattern in ventilated rooms - measurements and computations", in *Proc. of 14th AIVC Conference*, 1993.
- [50] Regard, M., Carrie, F.R., Voeltzel, A. and Richalet, V., "Measurement and CFD modeling of IAQ indices", in *Proc. of 16th AIVC Conference*, 1995.
- [51] Jacobsen, T.V. and Nielsen, P.V., "Numerical modeling of thermal environment in a displacement-ventilated room", in *Proc. of Indoor Air 93*, Vol. 5, 1993.
- [52] Skovgaard, M. and Nielsen, P.V., "Modelling complex inlet geometries in CFD - Applied to air flow in ventilated rooms", in *Proc. of 12th AIVC Conference*, Vol. 3, p.183-200, 1991.
- [53] Modest, M.F., "Radiative Heat Transfer. Series in Mechanical Engineering", McGraw Hill, 1993.
- [54] Chui, E.H. and Raithby, G.D., "Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method", in *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol.23, p.269-288, 1993.

- [55] Raithby, G.D. and Chui, E.H., "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media", in J. Heat Transfer, Vol. 112, p.415-423, 1990.
- [56] Murthy, J.Y. and Mathur, S.R., "A Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes", in Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 36<sup>th</sup>, Reno, 1998.
- [57] ISO 7730:1994, "Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort", 1994.
- [58] ACGIH, "Threshold limits values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices", in American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, 1995.
- [59] Bright, P.D., Mader, M.J., Carpenter, D.R. and Hermon Cruz, I.Z., "Guide for Indoor Air Quality Surveys", in Brooks Air Force Base Armstrong Laboratory AL-TR-1992-0016, Texas, 1992.
- [60] Fanger, P.O. and Berg-Munch, B., "Ventilation Requirements for the control of body odor. Proceedings of an Engineering Foundation Conference on Management of Atmospheres in Tightly Enclosed Spaces", in American Society of heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, p.45-60, Atlanta, 1983.
- [61] ASHRAE Handbook, "Duct and pipe design", Space Air Diffusion Chapter 31, 1995-1999.
- [62] Nota Técnica NT-SCE-02, "Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE", 2009.
- [63] ASHRAE Fundamentals Handbook, "Thermal Comfort", Chapter 8, 1997.
- [64] Persily, A.K., Emmerich, S.J., "State-of-the-Art Review of CO<sub>2</sub> Demand Controlled Ventilation Technology and Application", in NISTIR 6729, 2001.



# Anexo I

Esta secção contém os dados detalhados do cálculo de carga térmica obtidos do Software DESIGN BUILDER®, para as envolventes que constituem o modelo de cálculo (sala de aula).



### Cargas térmicas da sala de aula

Building	Design Capacity (kW)	Design Flow Rate (m <sup>3</sup> /s)	Total Cooling Load (kW)	Sensible (kW)	Latent (kW)	Air Temperature (°C)	Humidity (%)
Sala de Aula	4.02	0.558	3.65	3.3	0.36	24	49.1

Time of Max Cooling	Max Op Temp in Day (°C)	Floor Area (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Flow/Floor Area (l/s-m <sup>2</sup> )
17:00	32.6	28.3	84.9	19.47

### Cargas térmicas detalhadas da sala de aula

Date/Time	Glazing kW	Walls kW	Ceilings (int) kW	Floors (int) kW	Ground Floors kW	Roofs kW	Doors and vents kW	Floors (ext) kW	Sensible Cooling kW
10-05-2002 0:30	-0.069845	0.452539	0.102721	0.215918	-0.135328	-0.575539	-0.02135	0.006848	0
10-05-2002 1:00	-0.070276	0.421216	0.114991	0.204973	-0.122937	-0.543813	-0.021928	0.006434	0
10-05-2002 1:30	-0.070651	0.390405	0.126877	0.194492	-0.110318	-0.516421	-0.022334	0.006035	0
10-05-2002 2:00	-0.071016	0.360352	0.13743	0.187419	-0.098282	-0.488624	-0.022672	0.005779	0
10-05-2002 2:30	-0.07098	0.330835	0.147411	0.178308	-0.086254	-0.4679	-0.022918	0.00543	0
10-05-2002 3:00	-0.070964	0.302379	0.156022	0.172149	-0.074976	-0.446347	-0.023127	0.005208	0
10-05-2002 3:30	-0.070589	0.274996	0.163748	0.166048	-0.06406	-0.427414	-0.023277	0.004983	0
10-05-2002 4:00	-0.070311	0.247431	0.169299	0.161215	-0.054707	-0.408907	-0.023452	0.004812	0
10-05-2002 4:30	-0.06931	0.222893	0.175903	0.15517	-0.04412	-0.393279	-0.023448	0.004593	0
10-05-2002 5:00	-0.068319	0.19762	0.179857	0.150583	-0.035711	-0.376343	-0.023476	0.004441	0
10-05-2002 5:30	-0.066094	0.173747	0.183314	0.145354	-0.027422	-0.359471	-0.023383	0.004271	0
10-05-2002 6:00	-0.062244	0.144992	0.182565	0.128215	-0.022757	-0.314314	-0.023271	0.003683	0
10-05-2002 6:30	-0.056646	0.110516	0.178662	0.097387	-0.020535	-0.243542	-0.022943	0.002583	0

(Continua na página seguinte)

Date/Time	Glazing	Walls	Ceilings (int)	Floors (int)	Ground Floors	Roofs	Doors and vents	Floors (ext)	Sensible Cooling
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
10-05-2002 7:00	-0.041132	0.109881	0.20912	0.017705	0.013661	-0.069487	-0.01991	-0.000381	0
10-05-2002 7:30	-0.020949	-0.117704	0.043045	-0.133248	-0.113166	0.176939	-0.02522	-0.00577	-1.413909
10-05-2002 8:00	-0.004172	0.026195	0.2069	-0.24616	0.059054	0.4724	-0.01443	-0.00998	-1.476025
10-05-2002 8:30	0.010472	-0.060536	0.180507	-0.347639	0.021641	0.701033	-0.010457	-0.013838	-1.453279
10-05-2002 9:00	0.019615	-0.119679	0.159313	-0.431002	0.007367	0.924566	-0.003383	-0.016973	-1.498339
10-05-2002 9:30	0.031153	-0.174	0.13616	-0.508976	-0.006368	1.130392	0.006203	-0.019889	-1.568805
10-05-2002 10:00	0.038635	-0.215299	0.118492	-0.574642	-0.015376	1.296307	0.017855	-0.022319	-1.647506
10-05-2002 10:30	0.145912	-0.221975	0.128079	-0.625375	0.001016	1.412169	0.031393	-0.024188	-1.790071
10-05-2002 11:00	0.15497	-0.245152	0.110807	-0.662877	-0.012621	1.458288	0.043808	-0.025575	-1.878325
10-05-2002 11:30	0.163525	-0.253292	0.096398	-0.670022	-0.02185	1.495714	0.055587	-0.025867	-1.973505
10-05-2002 12:00	0.169499	-0.248594	0.08521	-0.653676	-0.029088	1.510419	0.066214	-0.025317	-2.069098
10-05-2002 12:30	0.174269	-0.235181	0.076598	-0.627368	-0.035299	1.479584	0.075247	-0.02439	-2.147887
10-05-2002 13:00	0.182639	-0.213586	0.069575	-0.590275	-0.041273	1.418111	0.082346	-0.023062	-2.228449
10-05-2002 13:30	0.278076	-0.190706	0.054108	-0.521036	-0.05395	1.339294	0.08695	-0.020381	-2.353545
10-05-2002 14:00	0.565488	-0.179139	0.016421	-0.457951	-0.082732	1.23706	0.088407	-0.017864	-2.614102
10-05-2002 14:30	0.813585	-0.157137	-0.013774	-0.396201	-0.10603	1.110699	0.087806	-0.015608	-2.831951
10-05-2002 15:00	0.99178	-0.119114	-0.03116	-0.328502	-0.121588	0.964989	0.085302	-0.012999	-3.003381
10-05-2002 15:30	1.137368	-0.070507	-0.04435	-0.256083	-0.135773	0.803651	0.080603	-0.010171	-3.124303
10-05-2002 16:00	1.237878	-0.008329	-0.051096	-0.175906	-0.146106	0.633733	0.073844	-0.007008	-3.211632
10-05-2002 16:30	1.325862	0.0605	-0.056051	-0.100478	-0.155816	0.441487	0.064965	-0.004025	-3.273103
10-05-2002 17:00	1.343982	0.145319	-0.045673	-0.026695	-0.154727	0.236782	0.054642	-0.001037	-3.296645
10-05-2002 17:30	1.329576	0.360415	0.10362	0.030434	-0.053216	0.075505	0.049419	0.001326	0
10-05-2002 18:00	1.1784	-0.113694	-0.359093	0.081224	-0.458313	-0.060179	0.009697	0.003387	0
10-05-2002 18:30	1.028597	-0.079538	-0.384802	0.127077	-0.449319	-0.190069	0.002971	0.005102	0
10-05-2002 19:00	0.646984	0.058355	-0.278637	0.188982	-0.385671	-0.360919	0.000317	0.007229	0
10-05-2002 19:30	0.219174	0.243758	-0.128933	0.266822	-0.305186	-0.558213	-0.000054	0.009854	0
10-05-2002 20:00	-0.051908	0.437098	-0.001261	0.334033	-0.214247	-0.718018	-0.000709	0.012085	0
(Continua na página seguinte)									



Date/Time	Glazing	Walls	Ceilings (int)	Floors (int)	Ground Floors	Roofs	Doors and vents	Floors (ext)	Sensible Cooling
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
10-05-2002 20:30	-0.053743	0.539075	0.025409	0.362764	-0.201921	-0.776893	-0.004126	0.012948	0
10-05-2002 21:00	-0.057836	0.54169	0.00509	0.348085	-0.215155	-0.803322	-0.00906	0.012251	0
10-05-2002 21:30	-0.060964	0.564891	0.017266	0.325344	-0.204213	-0.784983	-0.012197	0.011293	0
10-05-2002 22:00	-0.06391	0.563882	0.028582	0.301744	-0.19515	-0.751447	-0.014885	0.0103	0
10-05-2002 22:30	-0.065844	0.553704	0.043639	0.279925	-0.183487	-0.715495	-0.016883	0.009394	0
10-05-2002 23:00	-0.067691	0.534208	0.058757	0.260768	-0.171646	-0.67957	-0.018483	0.008613	0
10-05-2002 23:30	-0.068594	0.510573	0.074615	0.244229	-0.158905	-0.643135	-0.01968	0.007954	0
11-05-2002	-0.069475	0.481931	0.0888	0.229097	-0.147552	-0.608682	-0.02066	0.007356	0

Date/Time	Mech Vent + Nat Vent + Infiltration	External Infiltration	External Vent.	Total Cooling	Relative Humidity	General Lighting	Occupancy
	ac/h	kW	kW	kW	%	kW	kW
10-05-2002 0:30	1.08153	-0.132595	-0.012806	0	41.71642	0	0
10-05-2002 1:00	1.08153	-0.127018	-0.012862	0	43.33506	0	0
10-05-2002 1:30	1.08153	-0.124131	-0.013074	0	44.76674	0	0
10-05-2002 2:00	1.08153	-0.119872	-0.013112	0	46.27731	0	0
10-05-2002 2:30	1.08153	-0.115645	-0.013116	0	47.66727	0	0
10-05-2002 3:00	1.08153	-0.112129	-0.013128	0	48.97512	0	0
10-05-2002 3:30	1.08153	-0.108957	-0.013129	0	50.09429	0	0
10-05-2002 4:00	1.08153	-0.103428	-0.012913	0	51.40409	0	0
10-05-2002 4:30	1.08153	-0.097082	-0.012597	0	52.46704	0	0
10-05-2002 5:00	1.08153	-0.091132	-0.012288	0	53.47577	0	0
10-05-2002 5:30	1.08153	-0.081066	-0.011616	0	54.36085	0	0
10-05-2002 6:00	1.08153	-0.072758	-0.011001	0	54.93005	0	0
10-05-2002 6:30	2.630521	-0.045111	-0.164558	0	55.66337	0	0
10-05-2002 7:00	2.630521	-0.040022	-0.147149	0	54.46503	0	0

(Continua na página seguinte)

Date/Time	Mech Vent + Nat Vent + Infiltration	External Infiltration	External Vent.	Total Cooling	Relative Humidity	General Lighting	Occupancy
	ac/h	kW	kW	kW	%	kW	kW
10-05-2002 7:30	2.630521	0.038539	0.033241	-1.808689	55.21933	0.566228	0.3133889
10-05-2002 8:00	2.630521	0.038217	0.065669	-1.8212	51.02856	0.566228	0.3860246
10-05-2002 8:30	2.630521	0.038658	0.102031	-1.766385	47.12123	0.566228	0.3860251
10-05-2002 9:00	2.630521	0.036274	0.138013	-1.811184	43.47863	0.566228	0.3860251
10-05-2002 9:30	2.630521	0.034329	0.179343	-1.884972	40.12831	0.566228	0.3860251
10-05-2002 10:00	2.630521	0.032676	0.220476	-1.967396	37.44299	0.566228	0.3860251
10-05-2002 10:30	2.630521	0.03306	0.266859	-2.117165	35.11283	0.566228	0.3860251
10-05-2002 11:00	2.630521	0.036749	0.312994	-2.207075	33.4379	0.566228	0.3860251
10-05-2002 11:30	2.630521	0.03851	0.356191	-2.304676	32.01617	0.566228	0.3860251
10-05-2002 12:00	2.630521	0.043148	0.399173	-2.403232	30.9536	0.566228	0.3860251
10-05-2002 12:30	2.630521	0.043151	0.431268	-2.48365	30.1202	0.566228	0.3860251
10-05-2002 13:00	2.630521	0.046055	0.463243	-2.566231	29.48832	0.566228	0.3860251
10-05-2002 13:30	2.630521	0.044895	0.484493	-2.69578	28.99135	0.566228	0.3860251
10-05-2002 14:00	2.630521	0.047201	0.505691	-2.967665	28.60474	0.566228	0.3860251
10-05-2002 14:30	2.630521	0.044865	0.513627	-3.189268	28.35328	0.566228	0.3860251
10-05-2002 15:00	2.630521	0.046221	0.521555	-3.367705	28.22232	0.566228	0.3860251
10-05-2002 15:30	2.630521	0.040409	0.513627	-3.486447	28.17587	0.566228	0.3860251
10-05-2002 16:00	2.630521	0.038457	0.505691	-3.57132	28.24078	0.566228	0.3860251
10-05-2002 16:30	2.630521	0.033812	0.487146	-3.630374	28.42005	0.566228	0.3860251
10-05-2002 17:00	2.630521	0.033332	0.468561	-3.652088	28.73813	0.566228	0.3860251
10-05-2002 17:30	2.630521	-0.149842	0.062139	0	22.21474	0	0
10-05-2002 18:00	2.630521	-0.208568	-0.083181	0	21.07325	0	0
10-05-2002 18:30	2.630521	-0.22866	-0.147624	0	21.36079	0	0
10-05-2002 19:00	2.630521	-0.220431	-0.156972	0	22.57938	0	0
10-05-2002 19:30	2.630521	-0.193649	-0.133021	0	24.55179	0	0
10-05-2002 20:00	2.630521	-0.170755	-0.120805	0	26.62926	0	0
(Continua na página seguinte)							

Date/Time	Mech Vent + Nat Vent + Infiltration	External Infiltration	External Vent.	Total Cooling	Relative Humidity	General Lighting	Occupancy
	ac/h	kW	kW	kW	%	kW	kW
10-05-2002 20:30	1.08153	-0.171542	-0.007926	0	27.93822	0	0
10-05-2002 21:00	1.08153	-0.166447	-0.00911	0	29.66273	0	0
10-05-2002 21:30	1.08153	-0.162423	-0.010119	0	31.36246	0	0
10-05-2002 22:00	1.08153	-0.159106	-0.011022	0	33.1334	0	0
10-05-2002 22:30	1.08153	-0.153976	-0.011631	0	34.90133	0	0
10-05-2002 23:00	1.08153	-0.148689	-0.012096	0	36.7425	0	0
10-05-2002 23:30	1.08153	-0.143479	-0.012437	0	38.40608	0	0
11-05-2002	1.08153	-0.137379	-0.012614	0	40.15523	0	0

Date/Time	Solar Gains Exterior Windows	Zone/Sys Sensible Cooling	Air Temperature	Radiant Temperature	Operative Temperature	Outside Dry-Bulb Temperature
	kW	kW	°C	°C	°C	°C
10-05-2002 0:30	0	0	27.89348	28.24794	28.07071	24.61381
10-05-2002 1:00	0	0	27.28346	27.65746	27.47046	24.23638
10-05-2002 1:30	0	0	26.77465	27.11898	26.94682	23.99911
10-05-2002 2:00	0	0	26.25521	26.61926	26.43723	23.76185
10-05-2002 2:30	0	0	25.79986	26.16595	25.98291	23.68093
10-05-2002 3:00	0	0	25.38584	25.74574	25.56579	23.6
10-05-2002 3:30	0	0	25.04573	25.35909	25.20241	23.68093
10-05-2002 4:00	0	0	24.65108	25.00237	24.82673	23.76185
10-05-2002 4:30	0	0	24.34357	24.67555	24.50956	23.99911
10-05-2002 5:00	0	0	24.05764	24.3762	24.21692	24.23638
10-05-2002 5:30	0	0	23.81252	24.10565	23.95908	24.61381
10-05-2002 6:00	6.59E-03	0	23.65202	23.93657	23.7943	24.99124
10-05-2002 6:30	1.57E-02	0	23.34554	23.90838	23.62696	25.48312
10-05-2002 7:00	0.05262	0	23.63432	24.18683	23.91058	25.975
10-05-2002 7:30	9.40E-02	-1.29112	22.99366	25.373	24.18333	26.54781

(Continua na página seguinte)

Date/Time	Solar Gains Exterior Windows	Zone/Sys Sensible Cooling	Air Temperature	Radiant Temperature	Operative Temperature	Outside Dry-Bulb Temperature
	kW	kW	°C	°C	°C	°C
10-05-2002 8:00	0.122394	-1.47136	24.12573	26.30504	25.21538	27.12061
10-05-2002 8:30	0.146172	-1.45317	25.48562	27.69559	26.59061	27.73531
10-05-2002 9:00	0.159732	-1.49834	27.01698	29.25091	28.13395	28.35
10-05-2002 9:30	0.179594	-1.56881	28.73414	30.98341	29.85877	28.96469
10-05-2002 10:00	0.186848	-1.64751	30.43359	32.81471	31.62415	29.57939
10-05-2002 10:30	6.65E-02	-1.79007	32.21803	34.66367	33.44085	30.15219
10-05-2002 11:00	7.06E-02	-1.87833	33.79376	36.5333	35.16353	30.725
10-05-2002 11:30	7.41E-02	-1.97351	35.38384	38.28762	36.83573	31.21688
10-05-2002 12:00	7.55E-02	-2.0691	36.79088	39.86748	38.32918	31.70876
10-05-2002 12:30	7.60E-02	-2.14789	38.06608	41.27366	39.66987	32.08619
10-05-2002 13:00	0.077996	-2.22845	39.15657	42.47715	40.81686	32.46362
10-05-2002 13:30	8.32E-02	-2.35355	40.08065	43.45071	41.76569	32.70088
10-05-2002 14:00	9.80E-02	-2.6141	40.78355	44.25799	42.52077	32.93814
10-05-2002 14:30	0.114327	-2.83195	41.25146	44.83671	43.04409	33.01907
10-05-2002 15:00	0.126498	-3.00338	41.48362	45.15372	43.31867	33.1
10-05-2002 15:30	0.137596	-3.1243	41.53613	45.21992	43.37803	33.01907
10-05-2002 16:00	0.145403	-3.21163	41.34189	45.01189	43.17689	32.93814
10-05-2002 16:30	0.152822	-3.2731	40.89384	44.57761	42.73573	32.70088
10-05-2002 17:00	0.153513	-3.29665	40.17968	43.90562	42.04265	32.46362
10-05-2002 17:30	0.153024	0	42.49694	42.89208	42.69451	32.08619
10-05-2002 18:00	0.141047	0	42.54449	42.76246	42.65348	31.70876
10-05-2002 18:30	0.126652	0	41.78712	42.03484	41.91098	31.21688
10-05-2002 19:00	8.39E-02	0	40.4251	40.84714	40.63612	30.725
10-05-2002 19:30	4.79E-02	0	38.61031	39.24842	38.92937	30.15219
10-05-2002 20:00	0	0	36.79355	37.41713	37.10534	29.57939
10-05-2002 20:30	0	0	35.49934	35.80507	35.65221	28.96469
10-05-2002 21:00	0	0	34.13847	34.49104	34.31476	28.35
(Continua na página seguinte)						

<b>Date/Time</b>	<b>Solar Gains Exterior Windows</b>	<b>Zone/Sys Sensible Cooling</b>	<b>Air Temperature</b>	<b>Radiant Temperature</b>	<b>Operative Temperature</b>	<b>Outside Dry-Bulb Temperature</b>
	<b>kW</b>	<b>kW</b>	<b>°C</b>	<b>°C</b>	<b>°C</b>	<b>°C</b>
10-05-2002 21:30	0	0	32.97071	33.29488	33.1328	27.7353
10-05-2002 22:00	0	0	31.89429	32.22881	32.06155	27.12061
10-05-2002 22:30	0	0	30.9283	31.2669	31.0976	26.54781
10-05-2002 23:00	0	0	30.01473	30.39855	30.20664	25.975
10-05-2002 23:30	0	0	29.25619	29.61056	29.43337	25.48312
11-05-2002	0	0	28.51263	28.89918	28.7059	24.99124